



Avaliação da Qualidade do Ar Interior em Salas de Aulas sem Sistemas AVAC

Filipe João Martins Rodrigues

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança
para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental*

Orientado por
Manuel Joaquim Sabença Feliciano
Carlos Pedro Coelho Ferreira

Bragança
2013



INSTITUTO POLITÉCNICO Escola Superior Agrária
DE BRAGANÇA

Avaliação da Qualidade do Ar Interior em Salas de Aulas sem Sistemas AVAC

Filipe João Martins Rodrigues

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança
para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental*

Orientado por

Manuel Joaquim Sabença Feliciano

Carlos Pedro Coelho Ferreira

**Bragança
2013**

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação, que significa o término de uma etapa importante da minha vida, queria deixar a minha gratidão e reconhecimento a todas as pessoas que de uma forma direta ou indireta contribuíram para o meu sucesso académico.

Desde já quero agradecer ao meu orientador de tese e mentor, Professor Doutor Manuel Joaquim Sabença Feliciano, pela confiança que tem depositado em mim durante as várias colaborações ao longo dos últimos anos. Queria ainda agradecer-lhe pelo desafio que me propôs para a elaboração deste trabalho e que eu aceitei com muito gosto e vontade, e também pela disponibilidade, paciência e apoio de que dispôs durante os trabalhos experimentais da dissertação.

Quero também agradecer ao meu coorientador, Engenheiro Carlos Pedro Coelho Ferreira, do Grupo Sondar, Aveiro, Portugal, pelo contributo técnico-científico oferecido durante a elaboração deste trabalho.

Expresso também os meus sinceros agradecimentos às direções das escolas Superior Agrária e Superior de Tecnologia e Gestão do IPB, bem como aos docentes e discentes de ambas as escolas envolvidos no trabalho, sem os quais este não teria sido possível.

Uma palavra de apreço ao Professor Doutor João Azevedo, pelas oportunidades de enriquecimento científico oferecidas durante o meu percurso académico, bem como pelo apoio e disponibilidade que sempre colocou ao meu dispor.

À minha família, por todo apoio e sacrifício prestados durante todo o meu percurso académico. O meu MUITO OBRIGADO!

Por fim quero agradecer ao Engenheiro Filipe Maia, pelo apoio e amizade dados durante os tempos de colaboração em conjunto, e à minha colega, Engenheira Mónica Brás, pelo apoio, paciência, disponibilidade e amizade com que me premiou durante o mestrado. A ambos, MUITO OBRIGADO!

A todos o meu profundo agradecimento.

RESUMO

A maioria das pessoas passa grande parte do seu tempo em ambientes fechados, tais como habitações, escolas, entre outros. Por essa razão, a qualidade do ar interior (QAI) é um fator determinante para o desempenho de atividades nesses espaços. Em salas de aulas, o dióxido de carbono (CO_2) é um dos poluentes que mais afeta os utilizadores e gestores desses espaços, pois apesar de não ser considerado um gás poluente no exterior, em espaços de lecionação pode atingir níveis superiores aos valores máximos recomendáveis. Neste contexto, desenvolveu-se um estudo, no Instituto Politécnico de Bragança, com o objetivo de avaliar a dinâmica do CO_2 em salas de aulas sem ventilação mecânica, em função de alguns parâmetros como a dimensão do espaço, ocupação e abertura de janelas e portas, entre outros. Para este estudo foram selecionadas 4 salas com volumes compreendidos entre 90 e 380 m^3 . A monitorização do CO_2 , bem como da temperatura e da humidade relativa, foi realizada ao longo de várias semanas entre Março e Maio de 2013. As salas foram monitoradas em dias diferentes, entre as 9 e as 18 horas, tendo sido realizados um total de 6 ensaios por sala. As condições meteorológicas exteriores foram também registadas durante esse período. Foram ainda criadas as bases de uma ferramenta de gestão da qualidade do ar interior em salas de aulas, através do desenvolvimento/validação de um modelo simples de simulação dos níveis de CO_2 . Os principais resultados permitem identificar uma relação direta entre o poluente e o número de ocupantes, principalmente quando não ocorre renovação de ar. Nessas condições, os níveis de CO_2 atingem rapidamente os 1.800 mg/m^3 , mesmo em situações com taxas de ocupação inferiores a 30%. Os valores médios para o período de duração dos ensaios, situam-se entre os 3.600 e 5.400 mg/m^3 para as salas de volume inferior a 120 m^3 e nas salas de maior dimensão variam entre os 1.900 e 2.500 mg/m^3 . Verificou-se ainda que, na ausência de aberturas a entrada de ar novo situou-se em média abaixo de 1 renovação por hora, e com aberturas entre 1,8 e 3 renovações por hora. Quanto ao CO_2 simulado, o modelo utilizado consegue acompanhar bem as variações ao longo do tempo em 90% dos ensaios e explica com boa correlação cerca de 70%. A abertura de portas e janelas, em simultâneo ou não, poderá ser uma solução para assegurar a redução dos níveis de CO_2 abaixo dos níveis máximos recomendáveis, mas implicará áreas e tempos de abertura relativamente longos, que poderão ser desaconselhados nas épocas mais frias e ventosas. Os cenários permitiram concluir que por vezes é necessário estar 1 janela aberta durante todo o período de aula para garantir que os níveis de CO_2 cumpram o estabelecido no quadro legal, mesmo com ocupações inferiores a 50%. Desenvolvimentos futuros permitirão efetuar simulações que incluam outras variáveis do processo, de modo a prever com maior exatidão soluções no âmbito da ventilação natural.

PALAVRAS-CHAVE

Ar interior, dióxido de carbono, salas de aulas, ventilação natural, modelação

ABSTRACT

Most people spend much of their time indoors, such as schools, at home, and other spaces. Therefore, indoor air quality is a key factor for the health and well-being of those who are exposed, to some extent, to indoor air prevailing in these places. In classrooms, carbon dioxide (CO₂) is one of the pollutants that most affects the users and managers of these spaces. CO₂ is not considered a pollutant when outdoors, but in classrooms can reach high levels above the maximum recommended values. In this perspective, a study was conducted, at *Instituto Politécnico de Bragança*, in order to evaluate CO₂ dynamics in classrooms without mechanical ventilation, regarding parameters like the room's dimensions, its occupancy rates, the opening of windows and doors, among others. Four rooms were selected with volumes ranging from 90 to 380 m³. CO₂, along with temperature and relative humidity, were monitored amid March and May 2013. The classrooms were evaluated in different days, between 9 a.m. and 6 p.m., for a total of six trials per room. Outdoor weather conditions were also monitored during that period. Also, the basis for a management tool for indoor air quality in classrooms was created, through the development and validation of a simple CO₂ simulation model. The main results showed a direct relation between CO₂ and the number of occupants, especially when no air exchange occur. In those conditions, levels of carbon dioxide rapidly reached 1,800 mg/m³, even with occupancy rates lower than 30%. The averaged CO₂ levels registered in the various tests ranged between 3,600 and 5,400 mg/m³ for the classrooms below 120 m³ and between 1,900 and 2,500 mg/m³ for bigger classrooms. It was also verified that the entry of new air was on average below 1 exchange per hour, with the windows and doors all shut, and between 1.8 and 3 with openings. Concerning the CO₂ simulations, the model was able to follow the temporal variations of CO₂ levels of 90% of all trials, explaining with a good correlation of about 70%. The opening of windows and doors, simultaneously or not, could be a good practical measure to ensure the reduction of CO₂ levels below the recommended values, but it will comprise greater opening areas with fairly longer periods, that may be discouraged with cold and windy weather. The scenarios showed that it is sometimes necessary to have an open window for the entire period to ensure CO₂ levels meet the legal requirements, even with occupation rates below 50%. Further simulation developments, with inclusion of other relevant variables, will be implemented in order to predict better solutions regarding natural ventilation.

KEYWORDS

Indoor air, carbon dioxide, classrooms, natural ventilation, modeling

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo	iii
<i>Abstract</i>	iv
Índice	v
Índice de Figuras.....	vii
Simbologia e Nomenclatura	ix
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Organização da tese	4
2. Qualidade do Ar em Espaços Interiores	7
2.1. Breve enquadramento	7
2.2. Ventilação em espaços fechados.....	9
2.2.1. Ventilação de um só lado	11
2.2.2. Ventilação cruzada	12
2.2.3. Ventilação por efeito de chaminé.....	13
2.3. Quadro legal.....	14
2.3.1. Na União Europeia.....	15
2.3.2. Em Portugal.....	17
3. Avaliação do CO₂ em Salas de Aula do IPB	25
3.1. Descrição Experimental	25
3.1.1. Localização geográfica dos espaços de estudo.....	25
3.1.2. Caracterização das salas de aulas	26
3.1.3. Medição de Parâmetros de QAI	27
3.1.4. Tratamento de dados/informação	29
3.2. Avaliação das concentrações de CO ₂	32
3.3. Avaliação das Taxas de Ventilação	36
4. Ferramenta de Gestão dos Níveis de CO₂ em Salas de Aula	41
4.1. Breve descrição da ferramenta.....	41
4.2. Simulação dos níveis de CO ₂	42
4.3. Avaliação dos níveis simulados de CO ₂	47
4.4. Utilização da ferramenta	52
5. Conclusões	59
Referências bibliográficas	61
Anexos	67

ÍNDICE DE FIGURAS

1.

Figura 1.1 – Esquema representativo dos principais fatores que afetam a qualidade do ar em espaços fechados.....	2
Figura 1.2 – Breve enquadramento dos objetivos da investigação desenvolvida.	3

2.

Figura 2.1 – Hierarquia de sistemas de ventilação (adaptado de Etheridge, 2012).	10
Figura 2.2 – Esquema representativo da ventilação de um só lado.	11
Figura 2.3 – Representação da ventilação natural cruzada com aberturas ao mesmo nível.	12
Figura 2.4 – Representação esquemática da ventilação natural por convecção com abertura de lado e no teto.....	13
Figura 2.5 – Diplomas legais e documentos técnicos relevantes em matéria de QAI na União Europeia e em Portugal.	14
Figura 2.6 – Certificado de Desempenho Energético e da Qualidade do Ar Interior (A: folha de rosto, B: parâmetros de QAI).	21

3.

Figura 3.1 – Localização do local de estudo na cidade de Bragança.....	25
Figura 3.2 – Representação geométrica das salas monitoradas na ESA e na ESTiG (ver anexo II).....	27
Figura 3.3 – Sonda DirectSense® IQ-610 (A) com conexão para PDA Socket® SoMo 650-DX (B).....	29
Figura 3.4 – Gráficos da variação temporal de CO ₂ com duração de aberturas, para os ensaios realizados na sala G5-S3/01.	32
Figura 3.5 – Gráficos da variação temporal de CO ₂ com duração de aberturas, para os ensaios realizados na sala G3-S5/01.	33
Figura 3.6 – Gráficos da variação temporal de CO ₂ com duração de aberturas, nos seis ensaios realizados na sala 115.....	34
Figura 3.7 – Gráficos da variação temporal de CO ₂ com duração de aberturas, nos ensaios realizados na sala 117.....	35
Figura 3.8 – Renovações de ar por hora com destaques para os valores mais elevados, registadas na sala G5-S3/01.	37
Figura 3.9 – Renovações de ar por hora com destaques para os valores mais elevados, registadas na sala G3-S5/01.	38
Figura 3.10 – Renovações de ar por hora com destaques para os valores mais elevados, registadas na sala 115.....	39
Figura 3.11 – Renovações de ar por hora com destaques para os valores mais elevados, registadas na sala 117.....	40

4.

Figura 4.1 – Interface da ferramenta de gestão do CO ₂ em salas de aula em Microsoft Excel®.	41
Figura 4.2 – Representação conceptual do processo de modelação.	42
Figura 4.3 – Níveis de CO ₂ observados e simulados em conjunto com a duração das aberturas para a sala G5-S3/01.	47
Figura 4.4 - Níveis de CO ₂ observados e simulados em conjunto com a duração das aberturas para a sala G3-S5/01.	48
Figura 4.5 - Níveis de CO ₂ observados e simulados em conjunto com a duração das aberturas para a sala 115.....	50
Figura 4.6 – Níveis de CO ₂ observados e simulados em conjunto com a duração das aberturas para a sala 117.....	51

Figura 4.7 – Simulação da evolução temporal da concentração de CO ₂ e renovações de ar para o cenário 1, com tempo de abertura de 1 hora, para meia janela aberta.	54
Figura 4.8 – Simulação da evolução temporal da concentração de CO ₂ e renovações de ar para o cenário 1, com tempo de abertura de 2 horas e meia janela aberta.	55
Figura 4.9 – Simulação da evolução temporal da concentração de CO ₂ e renovações de ar para o cenário 2.	56
Figura 4.10 – Simulação da evolução temporal da concentração de CO ₂ e renovações de ar para o cenário 3.	57
Figura 4.11 – Simulação da evolução temporal da concentração de CO ₂ e renovações de ar para o cenário 4.	58

ÍNDICE DE TABELAS

2.

Tabela 2.1 – Principais poluentes mensuráveis no interior e exterior de edifícios.	7
Tabela 2.2 – Regulamentos aprovados relativos ao desempenho energético e QAI dos edifícios.	18
Tabela 2.3 – Parâmetros físicos que influenciam a qualidade do ar interior.	18
Tabela 2.4 – Parâmetros químicos verificáveis em QAI.	19
Tabela 2.5 – Parâmetros microbiológicos abrangidos pelo RSECE.	19
Tabela 2.6 – Regulamentos aplicáveis e tipo de requisitos para edifícios novos, residenciais e de serviços.	20
Tabela 2.7 – Limiares de proteção e margem de tolerância para alguns poluentes físico-químicos (Portaria 353-A/2013).	22

3.

Tabela 3.1 – Principais características das salas monitoradas.	26
Tabela 3.2 – Calendário dos ensaios realizados em cada sala.	28
Tabela 3.3 – Ocupação, caudal de ar novo por ocupante e renovações de ar para as salas estudadas, com e sem aberturas.	36

4.

Tabela 4.1 – Parâmetros estatísticos utilizados na avaliação dos resultados simulados.	45
Tabela 4.2 – Parâmetros estatísticos calculados para os ensaios realizados na sala G5-S3/01.	48
Tabela 4.3 – Parâmetros estatísticos calculados para os ensaios realizados na sala G3-S5/01.	49
Tabela 4.4 – Parâmetros estatísticos calculados para os ensaios realizados na sala 115.	50
Tabela 4.5 – Parâmetros estatísticos calculados para os ensaios realizados na sala 117.	52
Tabela 4.6 – Parâmetros a utilizar na simulação de cenários em função das características das salas estudadas.	53

SIMBOLOGIA E NOMENCLATURA

ABREVIATURAS

ADENE	Agência para a Energia
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
ATSDR	<i>Agency for Toxic Substances and Disease Registry</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CEN	<i>Comité Européen de Normalisation</i>
CIBSE	<i>The Chartered Institution of Building Services Engineers</i>
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
DGEG	Direcção-Geral de Energia e Geologia
EEA	<i>European Environmental Agency</i>
EM	Estados-Membros da União Europeia
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
ESA	Escola Superior Agrária de Bragança
ESTiG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança
GEE	Gases de Efeito de Estufa
INE	Instituto Nacional de Estatística, I.P.
IPB	Instituto Politécnico de Bragança
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NDIR	<i>Non-Dispersive Infra-Red</i>
PDA	<i>Personal Digital Assistant</i>
QAI	Qualidade do Ar Interior
RCCTE	Regulamento das Características de Conforto Térmico dos Edifícios
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
SCE	Sistema de Certificação Energética de Edifícios
SCHER	<i>Scientific Committee on Health and Environmental Risks</i>
UE	União Europeia
WHO	<i>World Health Organization</i>

SÍMBOLOS

$A_{abertura}$	Área das aberturas da sala de aula	m^2
A_{Du}	Área de DuBois	m^2
A_L	Área de abertura em função da área das superfícies que constituem a sala	m^2
C_D	Coefficiente de descarga das aberturas	---
C_{ext}	Concentração de CO_2 no exterior	mg/m^3
$C(t_i)$	Concentração de CO_2 interior no instante $t=i$	mg/m^3
$C(t_{i-1})$	Concentração de CO_2 interior no instante $t=i-1$	mg/m^3

CO	Monóxido de Carbono	---
CO ₂	Dióxido de Carbono	---
C ₆ H ₆	Benzeno	---
CH ₂ O	Formaldeído	---
C _S	Coeficiente de efeito de chaminé	$(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})^2 / (\text{m}^4 \cdot ^\circ\text{C})$ ou $\text{cfm}^2 / (\text{in}^4 \cdot ^\circ\text{F})$
C _W	Coeficiente de vento	$(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})^2 / (\text{m}^4 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ ou $\text{cfm}^2 / (\text{in}^4 \cdot \text{mph})$
d	Índice de concordância	---
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
G _{CO2}	Taxa total de geração de CO ₂	mg/h
h _{abertura}	Altura das aberturas em relação ao solo	m
Hb	Altura média dos ocupantes na sala de aula	m
M	Taxa de metabolismo dos ocupantes na sala de aula	met
MG	Média geométrica	---
n	Número de ocupantes na sala de aula	---
NO ₂	Dióxido de Azoto	---
NO _x	Óxidos de Azoto	---
PM _{2.5}	Matéria particulada com diâmetro aerodinâmico equivalente ≤ 2,5 μm	---
PM ₁₀	Matéria particulada com diâmetro aerodinâmico equivalente ≤ 10 μm	--
Pr	Potência nominal de aquecimento ou arrefecimento	W ou kW
Q _{AN}	Caudal de ar novo	m ³ /h
Q _{AN_mod}	Caudal de ar novo modelado	m ³ /h
Q _{AN_mod_W}	Caudal de ar novo modelado por ação do vento	m ³ /h
Q _{AN_mod_T}	Caudal de ar novo modelado por ação da diferença térmica	m ³ /h
r	Coeficiente de correlação	---
RH	Humidade Relativa	%
Rn	Radão	---
RPH	Renovações de ar por hora	h ⁻¹
T _{ext}	Temperatura exterior	°C ou K
T _{int}	Temperatura interior	°C ou K
ΔT	Diferencial de temperatura entre o interior e exterior	°C ou K
U _w	Velocidade do vento	m/s
V	Volume	m ³
VG	Variância geométrica	---
Wb	Massa corporal média dos ocupantes na sala de aula	kg

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A necessidade energética mundial, associada à cada vez mais elevada escassez de combustíveis fósseis, tem aumentado nos últimos anos (Hussen, 2004). No entanto tem existido um alívio devido ao aumento das energias renováveis, principalmente a energia solar e hídrica, mas também a energia eólica e da biomassa (Davidrajuh, 2009). Esta alternativa surgiu essencialmente devido à evolução tecnológica e aos incentivos para o desenvolvimento por parte dos governos e organizações mundiais (Carneiro e Ferreira, 2012). O aproveitamento destes recursos renováveis não é total pois a tecnologia existente, apesar da sua evolução constante, ainda não consegue fornecer uma conversão sustentável da energia (Zito, 2010). Este motivo é normalmente um dos entraves ao investimento na produção de energias limpas e, por isso, muitas famílias ainda escolhem a biomassa como combustível no aquecimento doméstico. Em 2009, do total de energia consumida no sector doméstico, a biomassa e o carvão vegetal, ocupavam o segundo lugar com 36,3% (INE/DGEG, 2011).

Também nos últimos anos, a eficiência energética tem vindo a ganhar relevância no setor da construção civil, de modo a otimizar as habitações familiares, quer edifícios, quer moradias, para um consumo mínimo de energia, principalmente no aquecimento doméstico. A lareira aberta continua a ser uma opção simples, embora esteja mais associada a habitações rurais. Hoje em dia, o mais comum no mundo urbano é a utilização de caldeiras e lareiras fechadas com recuperação de calor. Esta opção permite utilizar material lenhoso compactado (pellets/briquetes), mantendo a atmosfera interior mais limpa. A ventilação das habitações, seja ela natural ou mecânica, permite a renovação do ar interior, podendo contribuir negativamente para a eficiência térmica da habitação (Etheridge, 2012). Contudo, renovar o ar é uma necessidade ao nível da saúde e, portanto, deve ser equacionada na caracterização energética das edificações. Este processo tem evoluído bastante desde 1970, primeiramente nos Estados Unidos, e mais tarde na Europa, ainda que mais associado ao local de trabalho (WHO, 2000; SCHER, 2007).

A preocupação com a Qualidade do Ar Interior (QAI) surgiu bastante relacionada com a certificação energética de edifícios, devido ao confinamento de determinados

poluentes. Enquanto no ar exterior a existência da dispersão de poluentes vai mantendo uma qualidade mais estável, o cenário muda no interior, pois os poluentes são forçados a ocupar espaços limitados e quando acumulam, a sua concentração aumenta. Devido a este facto, poluentes menos comuns surgem com maior frequência, sendo alguns deles nocivos a baixas concentrações.

A maioria das pessoas passa cerca de 85% a 90% do seu tempo em ambientes fechados (EEA, 2013), tais como habitações, escritórios, escolas, entre outros. Por essa razão, a QAI é tida como um dos fatores determinantes para a produtividade, o conforto e o bem-estar e saúde do homem (Burroughs e Hansen, 2011). Em edifícios escolares, particularmente em salas de aulas, o dióxido de carbono é um dos poluentes que mais preocupação pode criar aos utilizadores e gestores desses espaços. Apesar de não ser considerado um gás poluente no exterior, em espaços fechados, com ocupação humana e sem ventilação ou ventilação insuficiente, o CO₂ tende a acumular-se, podendo atingir níveis bastante superiores aos valores máximos recomendáveis.

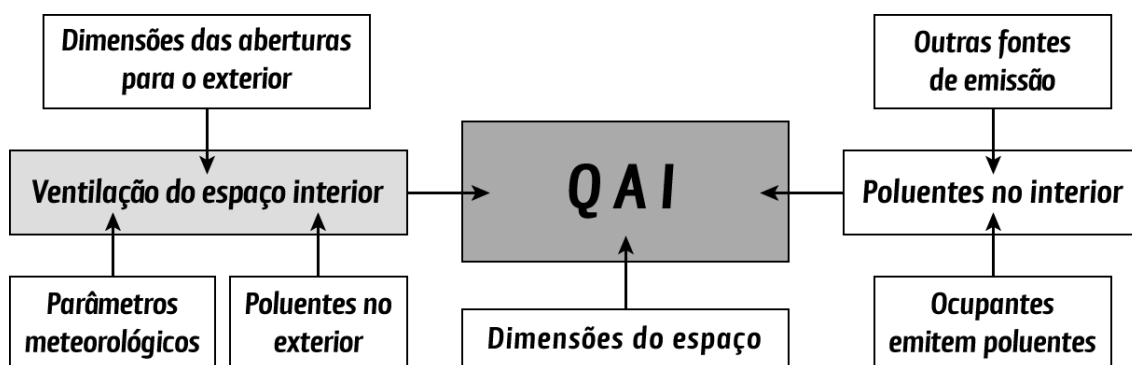


Figura 1.1 – Esquema representativo dos principais fatores que afetam a qualidade do ar em espaços fechados.

A ventilação dos espaços fechados deve ser feita pois, quer seja devido à emissão de poluentes pela ocupação humana, ou devido à emissão de poluentes pelos materiais e equipamentos no interior (Destailats *et al.*, 2008), a acumulação dos mesmos pode criar atmosferas interiores indesejáveis para a saúde humana (Jones, 1999; Wolkoff, 2013). A ventilação desses espaços, quer seja mecânica ou natural, está dependente de vários fatores que influenciam o ambiente interior sendo alguns deles provenientes do ambiente exterior. No exterior estamos a falar essencialmente de condições meteorológicas (e.g. temperatura e vento) e das concentrações de poluentes, especialmente dos que afetam o espaço interior.

1.2. OBJETIVOS

Com o presente estudo pretendeu-se avaliar os níveis de dióxido de carbono em salas de aulas sem ventilação mecânica em função dos fatores que determinam a abundância deste contaminante de atmosferas interiores, ao longo de períodos de utilização desses espaços. Avaliar as taxas de renovação de ar necessárias para se manter os níveis de CO₂ abaixo dos limites máximos recomendáveis e averiguar a possibilidade de se poder assegurar esse padrão de qualidade com recurso à ventilação natural foram dois dos objetivos específicos mais relevantes deste estudo. Pretendeu-se ainda desenvolver as bases de uma ferramenta, que de uma forma simples e rápida possa apoiar a gestão dos níveis de CO₂ neste tipo de espaço, recorrendo à ventilação natural.

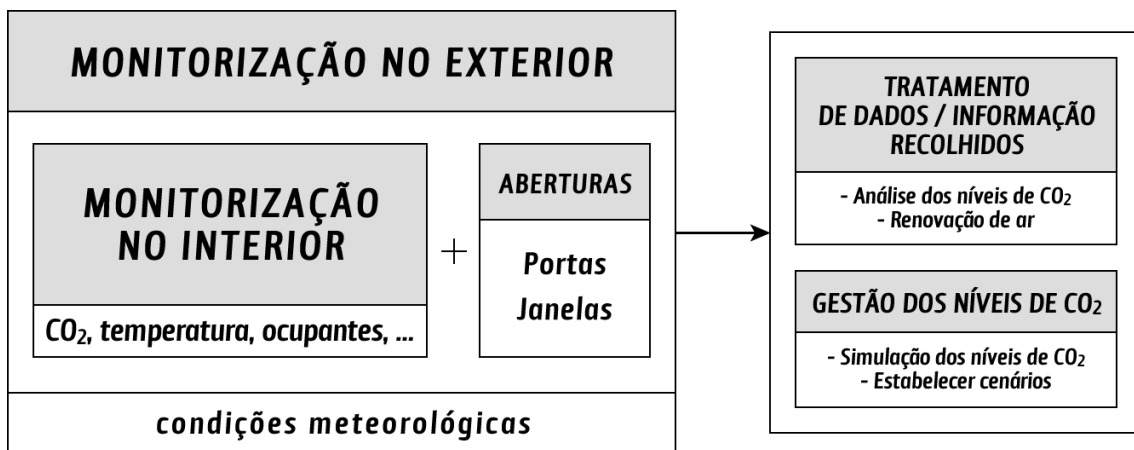


Figura 1.2 – Breve enquadramento dos objetivos da investigação desenvolvida.

A concretização destes objetivos envolveu essencialmente o desenvolvimento de três ações relevantes:

- Realização de vários ensaios de monitorização de parâmetros de Qualidade do Ar Interior em 4 salas do Instituto Politécnico de Bragança (IPB), duas na Escola Superior Agrária e duas na Escola Superior de Tecnologia e Gestão, ao longo de um período de aproximadamente três meses;
- Realização de monitorização de parâmetros meteorológicos na envolvente;

- Desenvolvimento de um modelo de simulação dos níveis de CO₂, em Visual Basic[®], que além de servir para validar os dados recolhidos no sistema real, permitiu responder às questões ou a algumas das questões subjacentes aos objetivos do estudo e constituir a base da ferramenta de gestão dos níveis de CO₂.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA TESE

Ao longo deste trabalho de dissertação, o objetivo foi elaborar um documento que disponibilize ao leitor a informação relevante para a compreensão do funcionamento dos principais processos que afetam a qualidade do ar interior, particularmente em salas de aulas para alunos do ensino superior. Como o tema deste trabalho é muito vasto, o desenvolvimento dos conteúdos poderá não ter o detalhe pretendido. Para além deste capítulo introdutório, este documento apresenta mais 3 capítulos de desenvolvimento e um 5º capítulo correspondente às conclusões do trabalho.

No segundo capítulo, intitulado *Qualidade do Ar em Espaços Interiores*, é descrito de forma sucinta, a qualidade do ar interior e os principais fatores relevantes para o tema, dando-se especial ênfase à ventilação natural em espaços interiores. É também feita uma descrição do quadro legal a nível europeu e nacional, fazendo um apanhado histórico dos principais diplomas legais e documentos com relevância regulamentar.

O 3º capítulo, *Avaliação dos Níveis de CO₂ em Salas de Aulas do IPB*, descreve a parte experimental do estudo realizado. É feita uma breve descrição da localização geográfica e uma caracterização das salas estudadas, bem como da metodologia adotada e do equipamento utilizado. A terminar o capítulo encontram-se a análise das concentrações de CO₂ em função do tempo e considerando parâmetros como a taxa de ocupação, as aberturas de janelas, entre outros, e a avaliação das taxas de ventilação prevalentes durante os ensaios.

O 4º capítulo designado por *Ferramenta de Gestão dos Níveis de CO₂ em Salas de Aulas*, é dedicado à gestão do CO₂ no interior das salas de aula, através da simulação simples da sua concentração. É feita uma breve descrição da interface da ferramenta de gestão, bem como a metodologia que assegura o cálculo matemático de parâmetros

como a produção de CO₂ e a ventilação natural, e a obtenção de alguns parâmetros estatísticos que permitem a avaliação do modelo utilizado. Depois é feita uma comparação gráfica entre as concentrações observadas e simuladas de CO₂ complementada por uma análise estatística simples. A ferramenta é depois utilizada para descrever alguns cenários que são alvo de alguma avaliação e discussão.

O último capítulo corresponde às principais conclusões da investigação realizada, com destaque para os aspetos positivos, mas sem esquecer o valor implícito das lacunas mais evidentes.

2. QUALIDADE DO AR EM ESPAÇOS INTERIORES

2.1. BREVE ENQUADRAMENTO

A preocupação com a qualidade do ar interior (QAI) em edifícios está relacionada com a exposição dos seus ocupantes a uma variedade de poluentes neles existentes, com reflexos negativos no comportamento, na produtividade, no bem-estar e na saúde das pessoas.

Alguns dos poluentes que podemos encontrar no interior de edifícios são os mesmos que encontramos no exterior, mas que nos podem afetar bastante mais, devido à sua acumulação em espaço fechado. Outros como o dióxido de carbono, cuja preocupação em atmosferas exteriores resulta da sua contribuição para o efeito de estufa, em atmosferas interiores exerce frequentemente um efeito pernicioso na saúde humana. Os contaminantes mais relevantes em atmosferas interiores são o dióxido de carbono (CO₂) e óxidos de azoto (NO_x), partículas PM₁₀ ou PM_{2.5}, compostos orgânicos voláteis (e.g. formaldeído), o radão (Rn), bem como determinados microrganismos (e.g. bactérias e fungos). O levantamento destes poluentes é feito de acordo com as características dos edifícios, mas sobretudo em função da atividade praticada no edifício. Grande parte dos poluentes são gases e portanto ocupam volume em espaços confinados, substituindo assim o oxigénio (Hess-Kosa, 2011). A tabela seguinte mostra alguns dos poluentes frequentemente mensuráveis no interior e no exterior de edifícios.

Tabela 2.1 – Principais poluentes mensuráveis no interior e exterior de edifícios.

Poluente	Fórmula química / Designação	Interior	Exterior
Monóxido de Carbono	CO	•	•
Dióxido de Carbono	CO ₂	•	•
Compostos Orgânicos Voláteis	COV	•	
Óxidos de Azoto	NO _x		•
Matéria Particulada	PM ₁₀	•	•
Ozono	O ₃	•	•
Formaldeído	CH ₂ O	•	
Benzeno	C ₆ H ₆	•	
Bolor	-	•	

A avaliação da qualidade do ar de atmosferas interiores deve ter em consideração a composição do ar exterior, uma vez que é este que se utiliza no processo de renovação do ar interior e que permite a diluição das cargas dos contaminantes. Outra preocupação são as condições térmicas dos edifícios, porque influenciam a presença e as quantidades de poluentes que são mais ou menos perigosos, dependendo dessas condições (WHO, 2009a).

Os efeitos na saúde humana provocados pelos poluentes do ar interior são em tudo muito semelhantes aos efeitos instigados pelos contaminantes do ar exterior. Os fatores que mais determinam a perigosidade de um poluente são para além da sua natureza, o tempo de exposição e a sua quantidade, em função do volume do espaço (Lee e Chang, 2000; Pepper e Carrington, 2009). Os efeitos na saúde estão mais associados a idosos e crianças, visto que passam muito tempo em espaços fechados (Abt *et al.*, 2000; Bai *et al.*, 2007). Os efeitos na saúde mais conhecidos são o cancro do pulmão devido à exposição ao radão, a doença do legionário associada a graves casos de pneumonia, causada pela bactéria *Legionella pneumophila*, a tuberculose provocada pela bactéria *Mycobacterium tuberculosis*, e envenenamento por monóxido de carbono (Li *et al.*, 2007; ASHRAE, 2011). Outros exemplos de efeitos são o agravamento de doentes com HIV/SIDA e doentes com órgãos transplantados, pois ficam mais suscetíveis aos fungos mais comuns. Existe também uma relação entre pessoas que fumam terem uma resposta imunitária diminuída, bem como pessoas que abusam do álcool ficarem mais afetadas ao nível do fígado. A humidade é outro fator que propicia o desenvolvimento de microrganismos como o bolor que podem agravar doentes com asma (Bornehag *et al.*, 2004; WHO, 2009b; Mendell *et al.*, 2011). A existência de vários poluentes no interior de espaços fechados pode provocar diversos problemas de saúde, centrando-se essencialmente nos sistemas cardiovascular e respiratório, mas também ao nível da visão.

Com o decorrer da evolução tecnológica, foi possível implementar, gradualmente, medidas mais eficientes de energia, de segurança e de higiene, que vieram possibilitar um maior conforto ao ser humano. A partir da década de 1970, com a crise energética, foi necessário adotar estratégias de construção, com vista a obter edifícios energeticamente mais eficientes, de modo a contrariar o aumento dos preços do petróleo (Sundell, 2004; Burroughs e Hansen, 2011). Algumas estratégias passaram pela diminuição de espaços por onde fosse possível o arrefecimento das casas (e.g. janelas), e pela procura de energias alternativas para o aquecimento doméstico. Essas opções

construtivas tiveram impactos negativos na qualidade do ar interior, devido à baixa taxa de renovação de ar em edifícios mais recentes (Hess-Kosa, 2011). Por esta época começaram a surgir queixas em massa, até que se começou a notar a culpabilidade das construções, surgindo assim o termo “*tight building syndrom*”, ou seja, a síndrome do edifício apertado. Acabou por ficar conhecido mais tarde (1986) por síndrome do edifício doente – *sick building syndrom* (Rostron, 1997). Por esta altura as primeiras investigações associaram grande parte das queixas ao formaldeído (CH₂O) e outros compostos emitidos e/ou acumulados pelos diversos materiais (e.g. mobiliário) localizados no interior dos edifícios (Rogers, 1987). Atualmente, há já muitas substâncias que foram proibidas no fabrico de um vasto leque de produtos, eliminando assim a possibilidade de emissão de contaminantes. Na década de oitenta foi quando a tecnologia começou a chegar ao utilizador, ou seja, começou a ter-se em casa e no escritório instrumentos que normalmente só se encontrariam em indústrias. Apareceram os primeiros computadores com impressoras (perigosidade das tintas), bem como a utilização de outros equipamentos elétricos e eletrónicos com substâncias, que se sabe agora serem, altamente perigosas. Isto suscitou uma nova panóplia de poluentes como os COV, o CO e o CO₂, ainda que os dois últimos estejam mais associados à queima doméstica de combustíveis fósseis. Estes poluentes foram também a grande preocupação da década de 1990 e continuam a sê-lo até hoje. O ano 2000 trouxe novas preocupações, na medida em que começaram a surgir casos relacionados com cancro, descobrindo-se assim o radão (ATSDR, 1990; EPA, 2012), a radiação eletromagnética (Boice e Tarone, 2011; Qin *et al.*, 2012) e problemas devido à proliferação de microrganismos como o bolor (Miller, 2011).

Desde que começaram a surgir de problemas de saúde humana associados a problemas de qualidade do ar interior, vários países começaram a legislar sobre o tema de modo a proteger o ser humano e mais tarde como complemento, também a apostar na construção dos edifícios do modo a que sejam energeticamente eficientes mas que proporcionem a renovação de ar.

2.2. VENTILAÇÃO EM ESPAÇOS FECHADOS

A ventilação de espaços fechados pode ser feita de várias formas, que se resumem a pelo menos três categorias principais: ventilação mecânica, natural e híbrida. A

ventilação mecânica é um processo que força a renovação do ar através de sistemas mecânicos. Esses sistemas são frequentemente de duas tipologias: equipamentos simples que apenas injetam ar no interior dos edifícios, ou equipamentos mais complexos acoplados a sistemas de tubagens, que para além da injeção de ar também o acondicionam (e.g. aquecimento/arrefecimento, filtragem de poluentes). Esta tipologia de ventilação é bastante atrativa, pois permite a ventilação de espaços fechados sem a preocupação de ter de abrir ou fechar janelas ou portas. Se for um sistema simples (e.g. ventoinha de janela), este ajudará apenas na infiltração ou extração de ar. A principal desvantagem é o gasto de energia com esses sistemas. O potencial crescimento de microrganismos em resultado da acumulação de partículas nestes sistemas (Matos *et al.*, 2010), em particular com o aumento da humidade, é também uma desvantagem, que tende a ser frequente em caso de manutenção ineficiente.

Os sistemas de ventilação natural proporcionam a renovação do ar através de mecanismos naturais como o vento e as diferenças de temperatura que promovem o movimento do ar pelas aberturas que existem entre o espaço e a sua envolvente. A ventilação natural pode ser entendida de três formas: ventilação natural planeada, ou seja, prevista no projeto de construção ou remodelação de um edifício (medida mais comum em novas construções); ventilação natural autocontrolada, através da abertura de janelas, portas, etc.; e ventilação que ocorre através de orifícios ou brechas que possam existir, reduzindo a estanqueidade do espaço. A ventilação natural é bastante frequente nos edifícios existentes com falta de sistemas mecânicos, sendo no entanto uma prática usual mesmo nos edifícios com os sistemas mecânicos mas cujo funcionamento não é assegurado por exiguidade de recursos financeiros. Alguns estudos (e.g. Bartlett *et al.*, 2004; Park *et al.*, 2008) mostram que em salas de aulas fechadas, as taxas de ventilação situam-se abaixo das 1 ou 1,5 renovações de ar por hora. A desvantagem principal da ventilação natural tem a ver com as flutuações que proporciona na temperatura e humidade interiores no momento das aberturas, devido à mudança constante das condições exteriores de temperatura e vento (Etheridge, 2012).

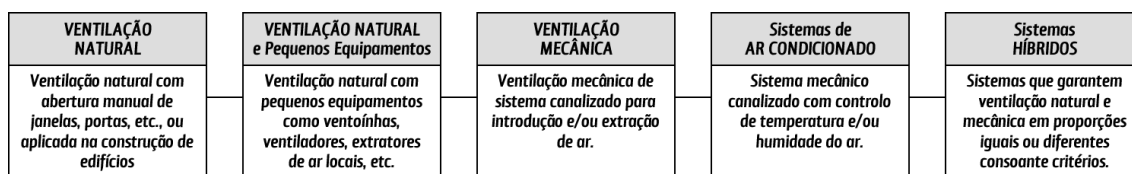


Figura 2.1 – Hierarquia de sistemas de ventilação (adaptado de Etheridge, 2012).

A ventilação híbrida é uma combinação entre a ventilação mecânica e a natural consoante determinados critérios (e.g. clima regional, condições meteorológicas). Neste capítulo, apenas será desenvolvida a ventilação natural por ação dos ocupantes, pelo facto de o presente estudo se ter realizado em condições de ventilação natural.

2.2.1. VENTILAÇÃO DE UM SÓ LADO

A ventilação de apenas um lado é o tipo de ventilação mais comum nas construções existentes. Normalmente existem aberturas para o exterior de um lado e aberturas para o interior de um outro lado, e as primeiras são as mais utilizadas para ventilação do espaço fechado, isto porque os edifícios existentes (e.g. apartamentos, salas de aula) são fechados para o exterior com exceção de um dos lados (Warren e Parkins, 1985). Isto também acontece com as frações dentro das habitações e outros edifícios.

Nesta tipologia de ventilação, o mecanismo responsável pela ventilação é essencialmente o diferencial de temperatura (Larsen e Heiselberg, 2008) que faz com que haja troca de ar, e por isso quanto maior for a diferença entre a temperatura interior e exterior, mais rapidamente o ar é renovado.

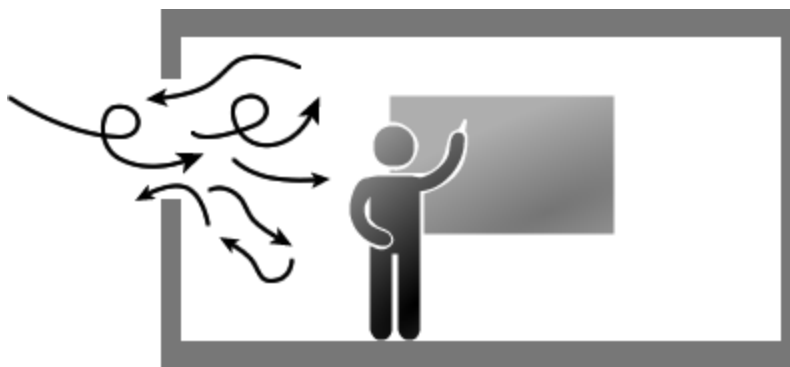


Figura 2.2 – Esquema representativo da ventilação de um só lado.

Se estivermos perante condições de vento moderado ou forte, poderemos acelerar a renovação do ar. No entanto, e de acordo com Alloca *et al* (2003) o efeito do vento tanto pode favorecer como contrariar o efeito do diferencial de temperatura e vice-versa.

2.2.2. VENTILAÇÃO CRUZADA

A ventilação cruzada ou por varrimento é quando a renovação do ar se dá através de aberturas em locais opostos do edifício ou de frações do mesmo, essencialmente por ação mecânica (força do vento). Neste caso, estamos a falar da presença de aberturas em lados opostos. Estas aberturas podem ser de tipologia diferente (e.g. janelas, portas), podem estar em alinhamentos diferentes e podem estar em contacto com envolventes diferentes (e.g. ar exterior, ar interior). Qualquer uma das combinações de aberturas possíveis conduz certamente a taxas de ventilação diferentes, pelo facto de criarem diferenças de pressão distintas entre o interior do compartimento e o seu exterior (Al-Rashidi *et al.*, 2012; Shen *et al.*, 2012).

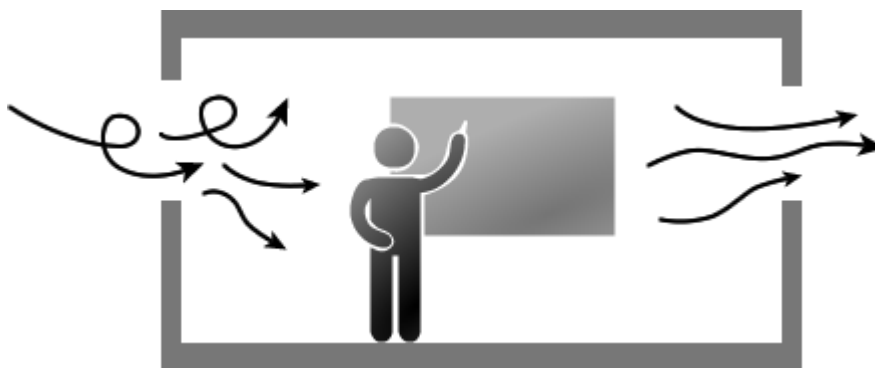


Figura 2.3 – Representação da ventilação natural cruzada com aberturas ao mesmo nível.

A existência de algum material no interior (e.g. mobiliário) pode também afetar a ventilação cruzada, podendo levar a sobrestimavas da renovação de ar (Chu e Chiang, 2013). Este método de ventilação natural poderá ser mais eficaz que a ventilação de um só lado (CIBSE, 2005a; Larsen, 2006). Dependendo das condições meteorológicas exteriores e do diferencial de pressão entre o interior e o exterior, poderá ocorrer desconforto dos ocupantes se houver correntes de ar demasiado elevadas. Quando as aberturas para o interior são portas, não é conveniente serem abertas se houver demasiado ruído no interior dos edifícios, qualquer que seja a atividade a decorrer no compartimento que se quer ventilar.

2.2.3. VENTILAÇÃO POR EFEITO DE CHAMINÉ

Este tipo de ventilação é bastante elucidativo, pois aproveita o conceito básico do aquecimento do ar por convecção. Ou seja, o ar no interior começa a aquecer, tornando-se menos denso e por isso tende a subir. Quando o ar está frio, as moléculas estão mais próximas umas das outras, concentrando a sua massa num determinado ponto e por isso o ar fica mais pesado e quando o ar aquece, as moléculas estão bem distribuídas pelo espaço fazendo com que o ar seja mais leve (Bergman *et al.*, 2011). Aqui claramente existe um diferencial de temperatura que permite a subida do ar e, por isso, a adoção de aberturas no teto.

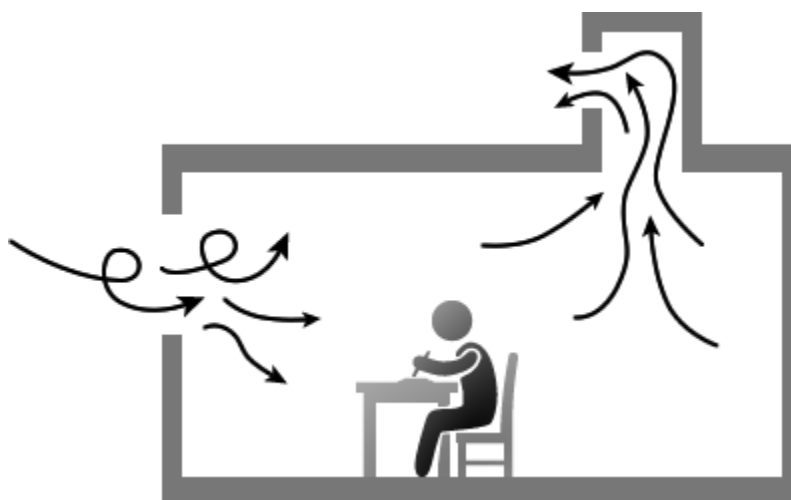


Figura 2.4 – Representação esquemática da ventilação natural por convecção com abertura de lado e no teto.

A ventilação por efeito de chaminé ou “*stack ventilation*” é um tipo de ventilação que tanto pode ser influenciado pelo vento como pela temperatura exteriores. Se apenas realizarmos a abertura do teto, como o ar quente está acumulado nessa zona, este sairá mais rápido para o exterior, devido às diferenças de pressão entre os dois ambientes. Aqui a maior influência é atribuída à diferença de temperatura. Se combinarmos a abertura do teto com uma abertura de lado, poderemos ter ar mais quente a sair por cima, com ar menos quente a entrar por uma janela ou porta. Nesta tipologia podemos ter a ação mecânica do vento bem como a influência do diferencial de pressões provocado pela temperatura interior e exterior. Como o ar menos quente entra a um nível mais baixo, irá forçar o ar mais quente a subir ou a sair da sala, propiciando o seu arejamento.

Apesar de este tipo de ventilação poder ser uma boa opção para arejamento de edifícios (Gładyszewska-Fiedoruk e Gajewski, 2012), pois combina conceitos da ventilação cruzada e da ventilação de um só lado, existe imprevisibilidade das condições exteriores que afeta bastante a ventilação natural (Khan *et al.*, 2008; Caciolo *et al.*, 2011).

2.3. QUADRO LEGAL

O estabelecimento de regras para a qualidade do ar interior tem por base promover um melhor ambiente interno, de modo a proteger a saúde humana e ao mesmo tempo evitar a emissão de poluentes nocivos. A existência de metodologias e valores limite legais proporcionam a melhor saúde dos edifícios e dos seus ocupantes. Na figura seguinte identificam-se os diplomas legais mais relevantes em matéria de QAI, desenvolvidos por grupos de trabalho a nível nacional (e.g. Matos *et al.*, 2010) e europeu (e.g. SCHER, 2007) e também por organizações internacionais (e.g. EPA, 2003; WHO, 2000, 2009a).

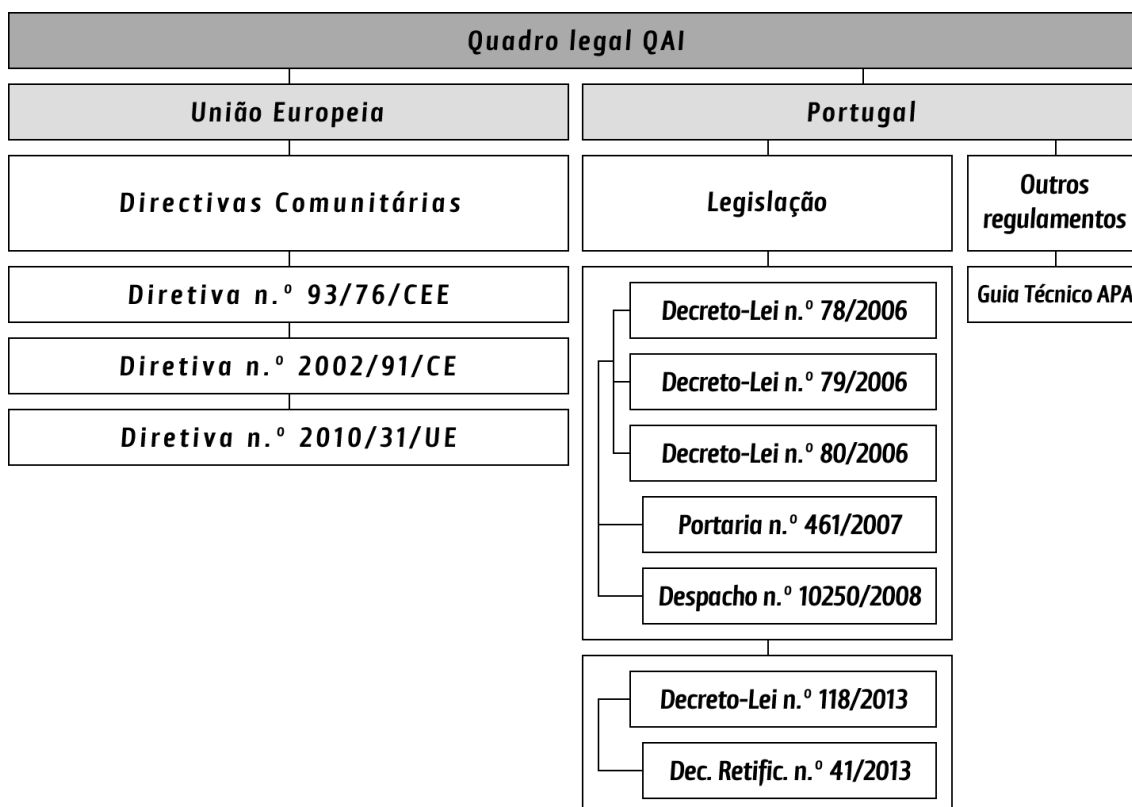


Figura 2.5 – Diplomas legais e documentos técnicos relevantes em matéria de QAI na União Europeia e em Portugal.

2.3.1. NA UNIÃO EUROPEIA

Na década de 1990, o Conselho da União Europeia aprovou a Diretiva 93/76/CEE, do Conselho, de 13 de Setembro, que tendo por base diretrizes do programa *Save* (Decisão 91/565/CEE), estabeleceu uma primeira abordagem à certificação energética tendo em conta alguns parâmetros relacionados com a qualidade do ar. Os objetivos de base eram a obtenção de informação concreta sobre as características energéticas dos edifícios, de modo a fomentar o mercado imobiliário e a poupança de energia. No entanto, esta diretiva apenas visa a certificação energética direcionada para a limitação das emissões de dióxido de carbono e, conseqüentemente a mitigação do problema das alterações climáticas. Muitos dos equipamentos residenciais de combustão, encontram-se ou no exterior do edifício, emitindo CO₂ diretamente para a atmosfera, ou encontram-se no interior, mas com canalização dos efluentes gasosos para o exterior. Ou seja, na perspetiva da saúde humana por esta altura, a preocupação acentuava-se mais na qualidade do ar exterior do que na do ar interior.

Já no novo milénio surgiu a Diretiva 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro, relativa ao desempenho energético dos edifícios, que veio trazer as mesmas ideias gerais de eficiência energética que a diretiva anterior, mas fazendo apelo às energias renováveis e à preocupação com a saúde dos ocupantes dos edifícios. Este documento invoca também a atenção dos Estados-Membros para os materiais de construção/renovação dos edifícios, de modo a que a eficiência térmica seja a máxima possível. No primeiro artigo desta diretiva, referente ao objetivo, são estabelecidos os requisitos necessários à certificação energética. O certificado energético pode conter um indicador de emissão de CO₂ (artigo 3.º), em função do enquadramento metodológico. A análise da qualidade do ar não está diretamente relacionada com a certificação energética, sendo considerada noutros aspetos como a ventilação do edifício ou a instalação de ar condicionado. Esses aspetos fazem parte da metodologia de cálculo do desempenho energético dos edifícios, com descrição mais detalhada no anexo único da diretiva. Em 2010, a Diretiva 2010/31/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Maio, veio consolidar a legislação a nível do desempenho energético dos edifícios, trazendo mais requisitos e metas mais ambiciosas a atingir a médio e longo prazo. Os Estados-Membros (EM) terão menos liberdade no estabelecimento dos requisitos e metas. A nova diretiva exige que os mesmos integrem

a nova informação nas suas legislações nacionais até ao final de 2012. A alteração (em relação à Diretiva 2002/91/CE) mais proeminente é a de todos os edifícios com uma área útil inferior a 1.000 m² serem agora obrigados a medidas de poupança energética, quando forem alvo de obras de reparação ou de remodelação. A construção de novos edifícios, independentemente da sua tipologia e uso estão também obrigados a avaliações e auditorias periódicas relativas ao desempenho energético e qualidade do ar interior. Os certificados energéticos terão de ser emitidos para novos edifícios, e para o ato de venda e de aluguer de edifícios existentes, sendo apenas válidos se incluírem boas recomendações de melhoria. Os EM são encorajados a oferecer incentivos e a realizar campanhas para que as melhorias sejam feitas regularmente. O objetivo geral é que perto de 2020 os edifícios necessitem de pouca energia e que essa necessidade seja suprimida pelas energias renováveis. Algo que já vem da diretiva anterior e que foi ignorado por grande parte dos EM é a obrigatoriedade de os edifícios públicos darem o exemplo. Esta nova diretiva obriga a que a partir de 31 de Dezembro de 2018, todos os edifícios ocupados e a serem ocupados por entidades públicas tenham necessidades energéticas quase nulas (artigo 9.º).

O maior desafio lançado pela UE nesta nova diretiva é a reabilitação do parque de edifícios existentes, ou seja, os EM devem implementar um sistema de recuperação de infraestruturas existentes e dotá-las de medidas de eficiência energética. Estas medidas podem passar por renovações na construção e/ou pela implementação de novas tecnologias. Este desafio será o mais complexo, pois muita da edificação existente pertence a privados e são de diferentes tipologias (e.g. moradias, plurifamiliares, serviços, etc.). A importância da qualidade do ar interior fica assim a cargo de cada Estado-Membro, sendo o objetivo principal da diretiva, a eficiência energética, tendo em conta um conjunto de fatores.

Dependendo da atividade realizada em cada edifício, existem poluentes a avaliar, uns mais importantes do que outros e por isso o comité recomenda o estudo de vários poluentes, com prioridade para apenas alguns como o formaldeído (CH₂O), o monóxido (CO) e o dióxido de carbono (CO₂), o dióxido de azoto (NO₂), o benzeno (C₆H₆) e o naftaleno (C₁₀H₈). Também é dada grande importância ao fumo ambiente proveniente do tabaco, devido à sua associação com doenças coronárias e respiratórias. O radão é outro poluente importante a analisar pois é já considerado como um problema comum na Europa (Darby *et al.*, 2005). Outros poluentes como o chumbo ou solventes, que ainda se encontram em tintas e materiais antigos também devem ser analisados. Em

relação aos materiais, devido muitas vezes à sua antiguidade não é possível estabelecer a sua natureza, para perceber a existência de substâncias nocivas no material ou a emissão das mesmas. Materiais como mesas e cadeiras e outro mobiliário (tratamento de madeiras), tintas nas paredes e colas, ou equipamentos como ar condicionado, aspiradores e impressoras, e até mesmo produtos de lavagem e de higiene pessoal, são potenciais emissores de compostos nocivos que afetam a QAI.

2.3.2. EM PORTUGAL

Em Portugal, a preocupação com os edifícios remonta à década de 1990, quando foi publicado o primeiro regime jurídico (Decreto-lei n.º 156/92) sobre a componente energética dos imóveis, relativa à qualidade dos sistemas de climatização e às condições do ambiente interior, que foi mais tarde revogado (1998), mas mantendo os mesmos princípios. Só em 2006, é que a componente da qualidade do ar interior deu entrada na legislação portuguesa, ainda que acoplada à certificação energética dos edifícios. As autoridades responsáveis pela implementação da nova legislação são a Direcção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) – parte de Energia, e a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) – parte de QAI. A gestão está a cargo da Agência para a Energia (ADENE).

Em 2002 a União Europeia, publicou a Diretiva 2002/91/CE, relativa ao desempenho energético dos edifícios, de modo a que os Estados-Membros criassem legislação própria para avaliar e certificar energeticamente os edifícios. Portugal foi um dos países que além da parte energética, acoplou também a avaliação da qualidade do ar. O porquê desta legislação conjunta deve-se ao facto de que a QAI é influenciada pela ventilação do ar que por sua vez afeta o desempenho energético das edificações. Esta legislação surgiu em 2006, através da publicação em Diário da República dos Decretos-Lei n.ºs 78/2006, 79/2006 e 80/2006, de 4 de Abril.

A legislação propriamente dita de QAI, concentra partes dos três diplomas (tabela 2.2), mas a base essencial encontra-se descrita no RSECE. Este remete-nos para o RCCTE, por exemplo para saber alguns parâmetros físicos obrigatórios no âmbito do RSECE. Os parâmetros físicos com obrigação de controlo são a temperatura, a humidade, a velocidade do ar e os caudais mínimos de ar novo.

Tabela 2.2 – Regulamentos aprovados relativos ao desempenho energético e QAI dos edifícios.

Diploma	Aprova	Sobre
Decreto-Lei n.º 78/2006, de 4 de Abril	Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE)	Desempenho energético e QAI em edifícios
Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de Abril	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE)	Definição da eficiência e características mínimas dos sistemas de climatização e QAI
Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de Abril	Regulamento das Características de Conforto Térmico dos Edifícios (RCCTE)	Definição de padrões de qualidade energético-ambiental da construção

Na tabela 2.3 encontram-se estes parâmetros físicos em relação a ambos os regulamentos. A temperatura é um parâmetro que deve ser medido para avaliar o conforto interior, sendo as de referência entre os 20 e os 25 °C pois é a temperatura normal das atividades humanas. A humidade relativa é um parâmetro de grande importância devido a poder ser favorável a poluentes de natureza microbiológica. A velocidade do ar também tem a sua importância, pois sabemos que quando o vento ganha velocidade torna-se mais frio e isso faz com que o conforto térmico diminua. Por esse motivo, uma boa QAI requer valores baixos da velocidade do ar, quase ao nível da ventilação natural (dependente do estado do vento no exterior).

Tabela 2.3 – Parâmetros físicos que influenciam a qualidade do ar interior.

Parâmetro	Valor	RCCTE	RSECE	Descrição
Temperatura [°C]	20 e 25	Alínea a) do artigo 14.º	-	Temperaturas de referência do Verão e do Inverno
Humidade relativa [%]	50	Alínea a) do artigo 14.º	-	Humidade relativa de referência para o Inverno
Velocidade do ar [m/s]	< 0,2	-	N.º 1 do artigo 4.º	Verificação obrigatória de novos sistemas AVAC, em edifícios novos ou existentes
Caudais mínimos de ar novo	Vários	Em função da taxa de renovação de ar, alínea a) do n.º 2 do artigo 4.º	N.º 1 do artigo 12.º e anexo VI	Em função do tipo de atividade do edifício

Através da velocidade do vento e dos caudais mínimos necessários em função da concentração dos poluentes no interior, é possível determinar a taxa de renovação de ar, sem permitir que haja grandes oscilações no conforto. No anexo VI do RSECE é possível consultar os caudais mínimos de ar novo por ocupante, para diversos espaços inclusive espaços escolares [$30 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ocupante})$].

Quanto aos parâmetros químicos, o RSECE dita valores limite que não devem ser ultrapassados. A sua verificação é obrigatória, em caso de edifícios ou frações autónomas existentes, aquando da realização de auditorias periódicas (n.º 2 do artigo 12.º e n.º 8 do artigo 29.º). Os poluentes a verificar e respetivos limites (quantidade de poluente por volume de ar) encontram-se na tabela seguinte.

Tabela 2.4 – Parâmetros químicos verificáveis em QAI.

Poluentes	Fórmula química / Designação	Limite	RSECE
Partículas	PM ₁₀	0,15 mg/m ³	Anexo VII
Dióxido de Carbono	CO ₂	1.800 mg/m ³	
Monóxido de Carbono	CO	12,5 mg/m ³	
Ozono	O ₃	0,2 mg/m ³	
Formaldeído	CH ₂ O	0,1 mg/m ³	
Compostos Orgânicos Voláteis totais	COV	0,6 mg/m ³	Alínea c) do n.º 8 do artigo 29.º
Radão	Rn	400 Bq/m ³	

Relativamente aos parâmetros biológicos, o RSECE também dita valores limite, considerando a mesma periodicidade de auditorias a edifícios ou partes autónomas existentes, tal como para os parâmetros químicos (n.ºs 8 e 9 do artigo 29.º). A tabela seguinte mostra os limites para bactérias (com especial atenção para a *Legionella*) e fungos em função de Unidades Formadoras de Colónias (UFC).

Tabela 2.5 – Parâmetros microbiológicos abrangidos pelo RSECE.

Microrganismos	Limite [UFC]	RSECE
Bactérias	500	Alínea b) do n.º 8, do artigo 29.º
<i>Legionella</i>	100	N.º 9, do artigo 29.º
Fungos	500	Alínea b) do n.º 8, do artigo 29.º

A aplicação do critério da *Legionella* depende de determinadas características do edifício como a produção de aerossóis através da existência de sistemas de climatização (e.g. torres de arrefecimento, humificadores). A amostragem é feita nos locais de maior risco. A legislação referida obriga à aplicação dos regulamentos propostos para edifícios novos, quer habitacionais quer de serviços, mediante alguns critérios de diferenciação. A tabela seguinte mostra os regulamentos aplicáveis aos edifícios novos residenciais e de serviços.

Tabela 2.6 – Regulamentos aplicáveis e tipo de requisitos para edifícios novos, residenciais e de serviços.

	Edifícios ¹	Regulamentos aplicáveis	Requisitos
Residenciais	Sem sistemas de climatização ou $Pr^2 \leq 25$ kW	RCCTE	Energéticos
	Com sistemas de climatização de $Pr^2 > 25$ kW	RCCTE + RSECE	Energéticos + QAI
Serviços	Todos os pequenos edifícios sem sistemas de climatização ou $Pr^2 \leq 25$ kW	RCCTE	Energéticos
	Pequenos: Áreas < 1000/500 m ² em todos os edifícios com $Pr^2 > 25$ kW	RSECE	Energéticos + QAI
	Grandes: Áreas > 1000/500 m ² em todos os edifícios	RSECE	Energéticos + QAI

¹Novos edifícios sujeitos a licenciamento municipal e a processo de Certificação Energética.

²Potência nominal de aquecimento ou arrefecimento.

As auditorias de QAI realizam-se aos edifícios de serviços pequenos (áreas < 500 ou 1.000 m²) e a edifícios de serviços, considerados grandes (áreas > 500 ou 1.000 m²). Edifícios como igrejas/locais de culto, edifícios militares reservados e outros são excluídos da aplicação de alguns dos regulamentos. A leitura da legislação referente a QAI pode ser dificultada, devido à sua existência em conjunto com a certificação energética, e com as diferentes referências para outros artigos e regulamentos. Contudo há formas mais próximas de obter esclarecimento, como por exemplo fazer um levantamento da informação necessária através do guia técnico da APA (2010).

Depois da legislação de 2006 referente ao SCE ter sido aprovada, só em Junho do ano seguinte é que surgiu a calendarização deste através da Portaria n.º 461/2007. Este atraso foi deliberadamente estabelecido para dar tempo ao estabelecimento de protocolos entre diversas entidades que atuam no SCE. Esse tempo de sensivelmente

um ano também serviu para a formação inicial de peritos qualificados e angariação de recursos e equipamentos necessários à aplicação do sistema.

O certificado de Desempenho Energético e da Qualidade do Ar Interior é emitido no âmbito do SCE (Decreto-Lei n.º 78/2006). O objetivo do certificado é simplificar a informação recolhida na análise de um edifício para poder ter valor para a comunidade, ou seja, de modo a que qualquer cidadão possa ter acesso a essa informação, quando seja do seu interesse (e.g. compra/venda de imóveis). Os modelos do certificado são aprovados pelo Despacho n.º 10250/2008, onde podemos ver no n.º 1 do artigo 2.º, as diferentes categorias de edifícios ou frações autónomas de edifícios aos quais se aplica a emissão de certificado. As categorias estão dispostas de acordo com critérios relativos à tipologia do imóvel. Para essas categorias existem três tipos de certificado (A, B e C) que correspondem aos primeiros três anexos do despacho.

Em relação ao ar interior, os certificados a emitir em conjunto com requisitos energéticos são:

- a) Tipo B: para pequenos (< 1.000 m²) edifícios de serviços com climatização (potência térmica > 25 kW) e grandes (> 500/1.000 m²) edifícios de serviços com ou sem climatização;
- b) Tipo C para habitações com climatização cuja potência térmica, correspondente à maior das potências de aquecimento ou arrefecimento do ar interior seja superior a 25 kW.

O certificado emitido após auditorias tem o mesmo formato, embora com pequenas modificações, nomeadamente a data de validade do certificado.

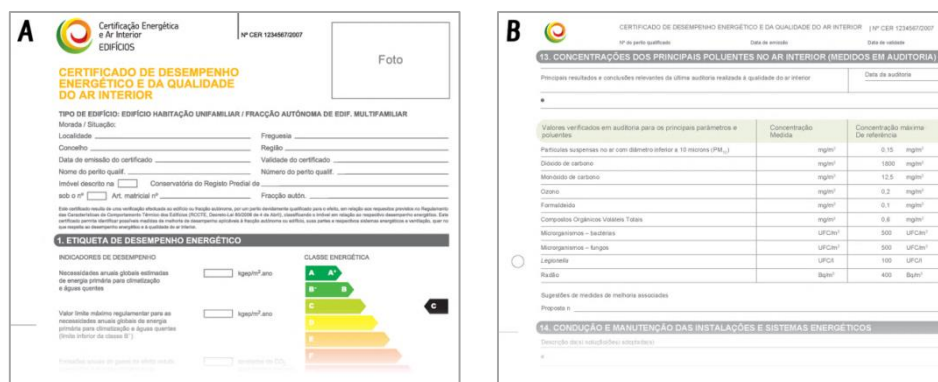


Figura 2.6 – Certificado de Desempenho Energético e da Qualidade do Ar Interior (A: folha de rosto, B: parâmetros de QAI).

A transposição da Diretiva 2010/31/UE para o direito nacional foi realizada através da publicação do Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de Agosto. Este diploma contempla agora toda a legislação referente ao desempenho energético dos edifícios, aprovando para o efeito o SCE (revisão), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), revogando assim grande parte dos Decretos-Lei n.ºs 78, 79 e 80/2006 (apenas a partir de 1 de Dezembro de 2013). No que concerne à QAI, as auditorias foram eliminadas, dando maior relevância à manutenção dos valores mínimos de caudal de ar novo e dos limites de proteção para os poluentes do ar interior, de modo a salvaguardar a saúde e o bem-estar dos ocupantes. Esses valores foram entretanto atualizados pela publicação da Portaria 353-A/2013, de 4 de Dezembro, que estabelece os valores mínimos de caudal de ar novo por espaço, sendo que para salas de aula, o valor mínimo é agora de 24 m³/(h·pessoa). A portaria também atualiza os limiares de proteção para vários poluentes. A tabela seguinte mostra esses valores para alguns poluentes.

Tabela 2.7 – Limiares de proteção e margem de tolerância para alguns poluentes físico-químicos (Portaria 353-A/2013).

Poluente	Limiar de proteção ^a	Margem de tolerância ^b [%]
Dióxido de carbono (CO ₂)	2250 mg/m ³ 1250 ppmv	30
Monóxido de carbono (CO)	10 mg/m ³ 9 ppmv	---
Formaldeído (CH ₂ O)	100 µg/m ³	---
Partículas em suspensão (fração PM ₁₀)	50 µg/m ³	100
Partículas em suspensão (fração PM _{2.5})	25 µg/m ³	100

^aOs limiares de proteção dizem respeito a uma média de 8 horas;

^bAs margens de tolerância previstas são aplicáveis a edifícios existentes e edifícios novos sem sistemas mecânicos de ventilação.

Para complementar a legislação de QAI em termos de monitorização, a Agência Portuguesa do Ambiente lançou o guia técnico intitulado: “Qualidade do Ar em Espaços Interiores” (Matos *et al.*, 2010). Este complemento é uma mais-valia para os técnicos e cientistas cuja vertente de trabalho se centra essencialmente na medição/monitorização de QAI, mas também para aqueles que pretendam realizar qualquer tipo de investigação referente a determinados critérios (i.e. monitorização de apenas um ou dois poluentes).

A finalidade deste guia é apoiar os profissionais da área na monitorização para dar respostas sobre QAI, bem como ajudar na resposta a causas responsáveis por uma qualidade do ar deficiente. O documento começa por fornecer um conjunto de definições dos conceitos mais básicos, informação introdutória e domínio de aplicação. É um guia que se baseia no material de apoio de várias organizações como a Organização Mundial de Saúde, orientando depois as metodologias em função dessas diretrizes. As metodologias utilizadas fazem referência a dois tipos de avaliação (inicial e detalhada), tendo em conta diversos fatores que vão desde as características do edifício a avaliar até às propriedades dos poluentes. A avaliação inicial é uma apreciação primária para tentar obter respostas concretas sobre o que não está correto com o edifício, de modo a escolher uma metodologia mais adequada. A avaliação detalhada vai ao pormenor da escolha dos locais de monitorização, do equipamento a utilizar com o método mais correto e válido, da caracterização das condições ambientais e da análise e caracterização de determinados poluentes. Algumas das metodologias desenvolvidas neste guia, foram adaptadas de vários documentos normativos (e.g. EPA, 2003; EN ISO 16000-1:2004, EN ISO 16000-5:2007), que pela sua aplicação a nível europeu ou internacional denotam um valor técnico-científico acrescido.

Em função de cada poluente, o guia permite a adoção de critérios que levam os estudos de QAI de encontro à conformidade legal ou ao encontro de problemas, através de valores limite e tempos de exposição ou taxas de ventilação.

3. AVALIAÇÃO DO CO₂ EM SALAS DE AULA DO IPB

3.1. DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

3.1.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DOS ESPAÇOS DE ESTUDO

A cidade de Bragança localizada no Nordeste Transmontado de Portugal, é um aglomerado médio com uma área de sensivelmente 25 km² e com uma população residente de 22.000 habitantes (INE, I.P., 2012). A topografia apresenta formas distintas, com uma altimetria a variar dos 500 a 800 metros.

A sazonalidade Inverno-Verão é muito distinta, sendo caracterizada por temperaturas baixas no tempo frio e altas na época quente. No Inverno os termómetros atingem valores negativos e no Verão as temperaturas sobem acima dos 35 °C. Os ventos dominantes são de oeste e noroeste, onde também se verificam os ventos mais intensos.

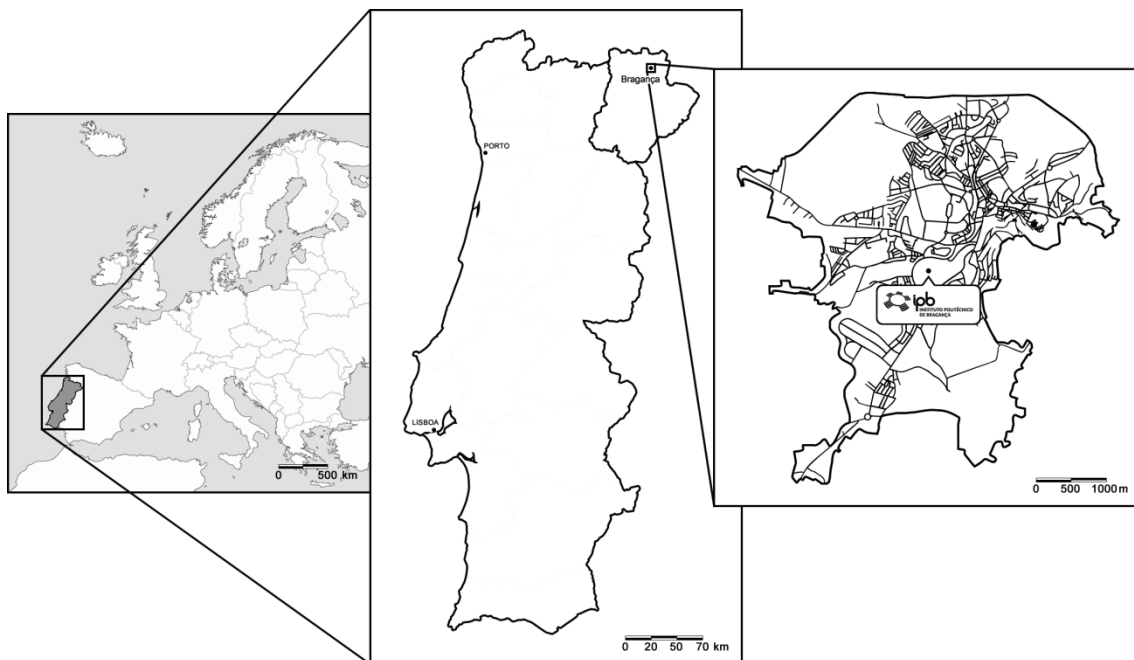


Figura 3.1 – Localização do local de estudo na cidade de Bragança.

As monitorizações do CO₂ e outros parâmetros decorreram em quatro salas no Instituto Politécnico de Bragança, tendo em conta duas construções de idades distintas, a Escola Superior Agrária (ESA) e a Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG).

Inicialmente, os ensaios eram para decorrer apenas na ESA, mas depois optou-se por ambas devido às diferenças de construção e à proximidade uma da outra.

3.1.2. CARACTERIZAÇÃO DAS SALAS DE AULAS

As salas escolhidas para os ensaios de QAI são salas apenas para atividades letivas não laboratoriais, onde os ocupantes desenvolvem atividades sedentárias. Foram selecionadas principalmente por terem volumes diferentes e, portanto, capacidade de ocupação também diferente. A tabela que se segue mostra algumas das características das salas, importantes à análise dos dados observados.

Tabela 3.1 – Principais características das salas monitoradas.

Sala	Volume [m ³]	Área [m ²]	Capacidade [ocupantes]	Aberturas	
				N.º	Tipo
G5-S3/01	166	46	30	8	3 janelas, 1 porta interior e 4 clarabóias
G3-S5/01	380	106	70	16	6 janelas, 2 portas interiores e 8 clarabóias
115	90	33	25	5	4 janelas e 1 porta interior
117	120	44	38	7	5 janelas e 2 portas interiores

No conjunto das quatro salas, as da Escola Superior Agrária, salas G3-S5/01 e G5-S3/01 são as salas de maior volume, com respetivamente, 380 e 180 m³. Estes espaços têm uma altura maior em relação às salas da ESTiG e ainda possuem clarabóias. Todas as salas detêm janelas de vidro duplo apenas de um lado. As salas da ESA têm porta(s) em paralelo e as salas da ESTiG têm porta(s) na perpendicular. A figura seguinte mostra a representação geométrica de cada sala, com as principais características.

Em termos direcionais, as janelas estão expostas a sul ($\approx 181^\circ$) em relação à sala G3-S5/01, e a sudeste para as salas G5-S3/01 ($\approx 131^\circ$), 115 ($\approx 150^\circ$) e 117 ($\approx 150^\circ$). Em termos construtivos, as salas na ESA têm paredes de alvenaria pintadas de branco e com janelas de vidro duplo (de batente). Parte da parede interior (parte superior) é feita de vidro simples, com cerca de 11 e 24 m², respetivamente para as salas G5-S3/01 e G3-S5/01. As portas dessas mesmas salas são de madeira e pintadas de branco.

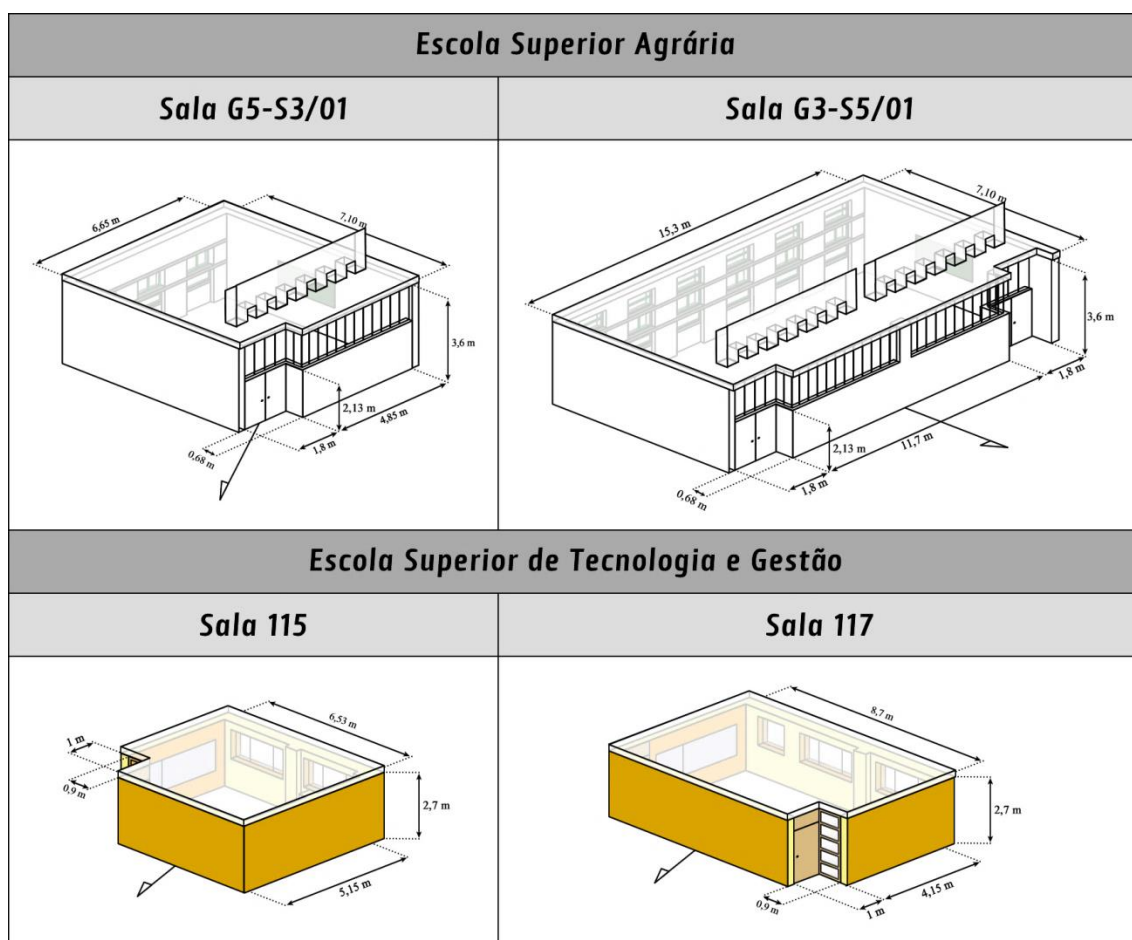


Figura 3.2 – Representação geométrica das salas monitoradas na ESA e na ESTiG (ver anexo II).

Nas salas da ESTiG as paredes são de alvenaria com a parede exterior revestida de tijolo aparente. As janelas nessa parede são de correr e com vidro duplo. Nas entradas para essas salas, os cantos (figura 3.2) são de madeira, com vidro simples não transparente na parte perpendicular à porta.

3.1.3. MEDIÇÃO DE PARÂMETROS DE QAI

Na etapa de seleção dos espaços fechados, a preocupação principal foi que tivessem aulas em grande parte do dia e em mais do que um dia por semana, de modo a realizarem-se as medições em condições de emissão de CO₂. Os ensaios decorreram de Março a Maio de 2013, realizando um total de 24 monitorizações (6 em cada sala), de modo a captar-se algum efeito de sazonalidade. O período diário escolhido foi desde as 9 horas da manhã até às 18 horas da tarde, com um técnico sempre presente para recolha

de informação. Em todas as salas foi possível realizar os ensaios em pelo menos 2 a 3 dias da semana diferentes.

Tabela 3.2 – Calendário dos ensaios realizados em cada sala.

Ensaio	Salas			
	G5-S3/01	G3-S5/01	115	117
1	09 de Março	07 de Março	05 de Março	06 de Março
2	19 de Março	21 de Março	20 de Março	22 de Março
3	05 de Abril	02 de Abril	03 de Abril	04 de Abril
4	20 de Abril	18 de Abril	16 de Abril	17 de Abril
5	18 de Maio	16 de Maio	14 de Maio	17 de Maio
6	28 de Maio	30 de Maio	29 de Maio	31 de Maio

A medição das dimensões das salas foi realizada, de modo a obter-se a área e volume úteis. Para além da dimensão das salas, foi também recolhida informação relativa à dimensão das aberturas. Em relação aos ocupantes, foi feita a sua contabilização tendo em atenção a hora de entrada e de saída. A estes foi-lhes pedido que preenchessem um pequeno questionário (ver anexo I), com vista a obter alguma informação pessoal (e.g. altura e peso), com o objetivo de poder mais tarde estimar a quantidade de poluente a ser emitida. O questionário incluía também questões para a avaliação de conforto térmico, assunto não analisado nesta dissertação. De modo a facilitar a tarefa de recolher várias informações ao mesmo tempo, foi criado um registo (ver modelo utilizado no anexo III) por ensaio, principalmente para apontar os instantes onde houve alterações nas salas (i.e. número de ocupantes, aberturas, inícios e fins de aula, etc.).

Em cada uma das salas foi monitorado o CO₂ (por deteção não dispersiva de infravermelhos, NDIR), a temperatura e humidade relativa, com recurso a um sistema de medição DirectSense[®] IQ-610 (GrayWolf, 2013) conectado a um PDA (figura 3.3), que permite a programação do equipamento e o armazenamento dos dados de minuto a minuto. O sensor foi colocado no centro de cada sala, em cima de uma mesa. Foi estabelecida uma altura de 1,5 metros de modo a não medir diretamente as emissões dos ocupantes, mas sim a mistura de ar. O perfil diário das concentrações de CO₂ da envolvente exterior foi avaliado, através da realização de medições em contínuo em dias diferentes. Nos dias dos ensaios realizaram-se medições pontuais na envolvente exterior e interior.

O registo de informação meteorológica como a velocidade e direção do vento (monitor de vento 05103, R.M. Young Company), a temperatura e humidade relativa do ar (termo-higrómetro CS215, Campbell Scientific) foi também assegurado durante os ensaios. As medições meteorológicas foram realizadas a cerca de 10 metros de altura, no campus do IPB para evitar que fenómenos mais locais (e.g. turbulência) afetassem demasiado os dados recolhidos.



Figura 3.3 – Sonda DirectSense® IQ-610 (A) com conexão para PDA Socket® SoMo 650-DX (B).

Durante os períodos letivos foram realizadas aberturas em todas as salas, de forma não regular, mas procurando abranger uma grande diversidade de situações, de modo a assegurar uma avaliação mais completa e representativa do efeito da abertura nos níveis de CO₂.

3.1.4. TRATAMENTO DE DADOS/INFORMAÇÃO

De modo a concretizar os objetivos previstos, todos os dados e informação recolhida nos diferentes ensaios foram organizados em folhas de cálculo. Para cada ensaio foi elaborada uma folha de cálculo onde nas colunas foi colocada informação sobre a evolução temporal da temperatura interior e exterior, da velocidade do vento e do CO₂ observado em ppmv. A primeira preocupação foi desenvolver macros para calcular as concentrações de CO₂, em mg/m³ e representar graficamente a evolução

temporal dos parâmetros medidos mais relevantes, de forma a avaliar numa primeira fase a fiabilidade das medições. De referir que as conversões da concentração de CO₂ entre ppmv e mg/m³ foram conseguidas através da equação dos gases ideais, à pressão atmosférica (101.325 Pa) e temperatura de 25 °C, tendo em conta a massa molar do CO₂ (44 g/mol). Procurou-se também estabelecer a comparação entre os níveis de CO₂ com os valores máximos recomendáveis, quer o valor de 1.800 mg/m³ (≈ 1.000 ppmv) estabelecido no RSECE (tabela 2.4), quer o valor de 2.250 mg/m³ (≈ 1.250 ppmv), porque surge como valor mais provável numa próxima revisão legislativa. A ASHRAE (2010) refere que exposição a valores de CO₂ acima de 9.000 mg/m³ (≈ 5.000 ppmv) começa a ser um sério risco para a saúde.

Com os registos dos níveis de CO₂ foi possível obter as renovações de ar das salas, ao longo do tempo, com e sem aberturas de janelas. Para o efeito, utilizou-se o método de Newton-Raphson (Verbeke e Cools, 1995; Boyer *et al.*, 1999) para resolver a equação geral da evolução temporal da concentração do CO₂ em ambientes interiores (CIBSE, 2005b; Griffiths e Eftekhari, 2008), em ordem à variável caudal de ar novo. A concentração de CO₂ no interior, é dada pela equação 3.1.

$$C(t_i) = C_{\text{ext}} + \frac{G_{\text{CO}_2}}{Q_{\text{AN}}} + \left[C(t_{i-1}) - C_{\text{ext}} - \frac{G_{\text{CO}_2}}{Q_{\text{AN}}} \right] \cdot e^{-\frac{Q_{\text{AN}}}{V} \cdot (t_i - t_{i-1})} \quad [\text{mg}/\text{m}^3] \quad (3.1)$$

Onde:

$C(t_i)$: Concentração de CO₂ no ar interior no instante t_i , [mg/m³];

$C(t_{i-1})$: Concentração de CO₂ no ar interior no instante t_{i-1} , [mg/m³];

C_{ext} : Valor médio da concentração de CO₂ no exterior, [mg/m³];

Q_{AN} : Caudal de ar novo, [m³/h];

G_{CO_2} : Taxa total de produção de CO₂ no espaço, [mg/h];

V : Volume do espaço, [m³];

t : Instante de tempo, genérico ou final, considerado para o cálculo, [h].

O método de Newton-Raphson foi usado para encontrar por aproximações sucessivas o valor de Q_{AN} , usando para o efeito os registos experimentais das concentrações de CO₂ no interior e no exterior e estimativas para taxa de produção metabólica de CO₂. O cálculo dessa taxa requer informação adicional como as características dos ocupantes (e.g. massa corporal, altura) para calcular a área de DuBois (Persily, 1997), através da aplicação da equação que se segue:

$$A_{Du} = 0,202 \cdot Wb^{0,425} \cdot Hb^{0,725} \quad [m^2] \quad (3.2)$$

Onde:

A_{Du} : Área de Dubois da superfície corporal, [m²];

Wb : Massa corporal típica, [kg];

Hb : Altura típica, [m].

A área de DuBois permite estimar a área corporal de um indivíduo, através da sua massa corporal e da sua altura. A determinação da taxa total de produção de CO₂ depende ainda da atividade metabólica (valor estabelecido para a tipologia de tarefas que os ocupantes executam dentro das salas de aula) e do número de ocupantes. Como grande parte das atividades letivas são sedentárias, a taxa de metabolismo dos ocupantes foi considerada sempre constante a 1,2 met (1 met = 58,15 W/m²), sendo a taxa de emissão de CO₂ resultante do metabolismo dos ocupantes obtida da seguinte forma:

$$G_{CO_2} = (17.000 \cdot A_{Du} \cdot M) \cdot n \quad (3.3)$$

Onde:

G_{CO_2} : Taxa total de produção de CO₂ no espaço, [mg/h];

A_{Du} : Área de Dubois da superfície corporal, [m²];

M : Taxa de metabolismo dos ocupantes, [met];

n : Número de ocupantes no espaço.

Por fim, foram calculadas as renovações de ar por hora (RPH) para cada sala, através da equação 3.4, dividindo o caudal de ar novo pelo volume útil do espaço interior.

$$RPH = \frac{Q_{AN}}{V} \quad (3.4)$$

Onde:

RPH: Renovações de ar por hora, [h⁻¹];

Q_{AN} : Caudal de ar novo, [m³/h];

V : Volume do espaço, [m³];

As RPH foram determinadas para todas as salas, com e sem aberturas, através do caudal de ar novo. Este foi também comparado com o caudal mínimo de ar novo por ocupante (anexo VI do RSECE).

3.2. AVALIAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE CO₂

Sala G5-S3/01

Na figura 3.4 apresentam-se os níveis de CO₂ obtidos para os diferentes ensaios realizados na sala G5-S3/01. Representam-se igualmente os períodos em que se procedeu à abertura de janelas/portas/clarabóias não resultantes da entrada ou da saída de alunos. Nesta sala, as concentrações de CO₂ estiveram sempre abaixo dos 6.000 mg/m³, variando os valores médios da sala entre os 1.000 e os 3.000 mg/m³ (≈ 560 e 1.670 ppmv). Em termos de ocupação, a sala nunca atingiu a capacidade máxima, tendo-se registado valores médios entre os 10 e os 20% de capacidade. Esporadicamente a taxa de ocupação foi superior, tendo atingido os 30% em algumas aulas e, no segundo ensaio, registou-se uma taxa de ocupação máxima de 70% (ver anexo V).

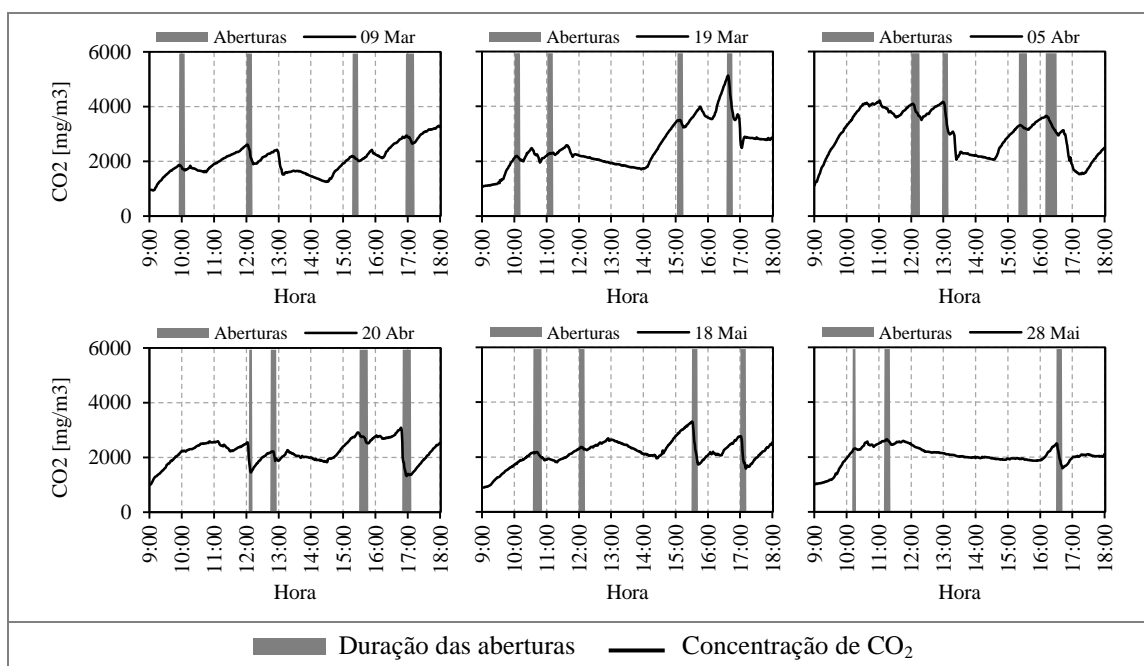


Figura 3.4 – Gráficos da variação temporal de CO₂ com duração de aberturas, para os ensaios realizados na sala G5-S3/01.

A temperatura da sala (ver anexos IV e V), no geral, não apresenta oscilações significativas, com a exceção de duas ocorrências nos 4.º e 5.º ensaios. Nesses casos a temperatura desceu 1,2 °C, coincidindo ambas as situações com aberturas de uma janela em conjunto com as clarabóias (aberturas às 12:00 e às 15:30, respetivamente para o 4.º e 5.º ensaios). A humidade relativa (ver anexo VI), em média situou-se nos 40-46%.

Sala G3-S5/01

Para a sala maior, a G3-S5/01, as concentrações de CO₂ nos diferentes ensaios (figura 3.5), apenas ultrapassam os 3.000 mg/m³ no 3º e 4º ensaios, situando-se em média entre os 1.300 e os 2.400 mg/m³ (≈ 723 e 1.335 ppmv).

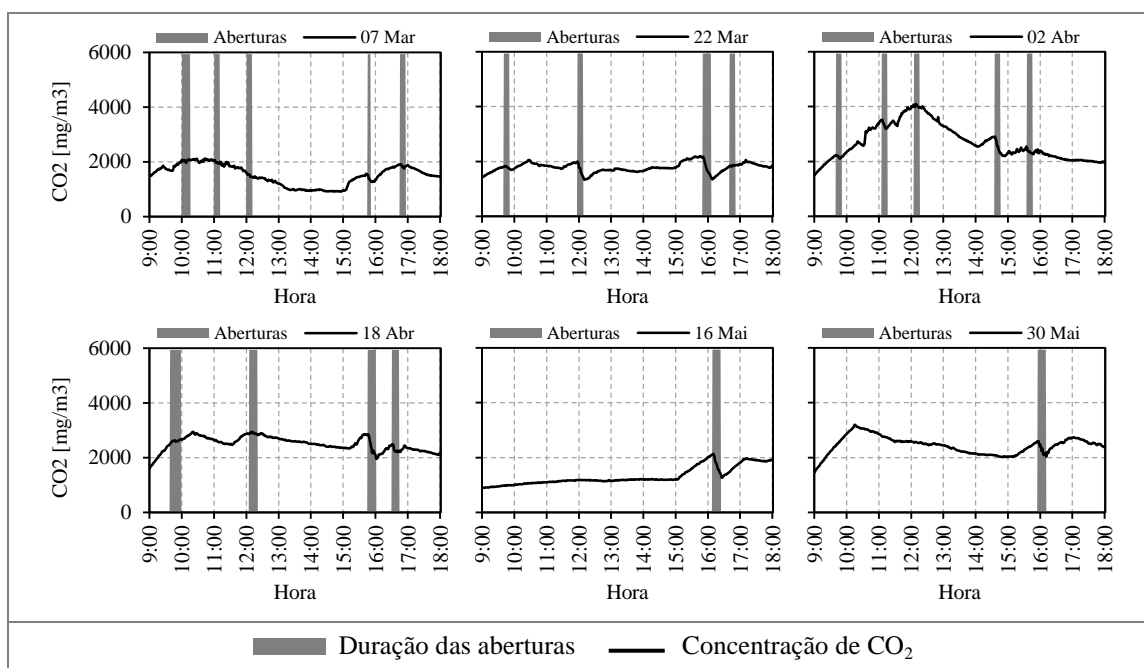


Figura 3.5 – Gráficos da variação temporal de CO₂ com duração de aberturas, para os ensaios realizados na sala G3-S5/01.

Nesta sala pode dizer-se que foi onde ocorreram níveis de CO₂, com oscilações menos acentuadas, o que pode ter a ver com o volume de ar que garante por ocupante (5,4 m³), mas também devido à taxa de ocupação que se registou, em média nos 20%, com valores a atingir quase 40% em alguns períodos dos ensaios 1 e 3. A temperatura dentro da sala, no geral, não apresenta variações significativas (em média entre os 20 e os 23 °C), com a exceção de duas ocorrências nos 2.º e 5.º ensaios. Nesses casos a temperatura desceu 2,4 e 1,7 °C, respetivamente, coincidindo no primeiro caso com a abertura de uma janela e no segundo caso com a abertura de parte das clarabóias em conjunto com uma janela. Essas ocorrências foram registadas às 11:57 para o 2º ensaio e às 16:10 no 5º ensaio. Semelhante à sala anterior a humidade relativa (ver anexo VI) situa-se perto dos 50% (41-46%), com os valores mais baixos a corresponder ao 2º e 5º ensaios.

Sala 115

Na sala 115 da ESTiG, no geral os valores de CO₂ situam-se abaixo das 10.000 mg/m³, com a exceção do 1º ensaio, devido à ocupação ter estado em média acima dos 40%, (percentil 90: 92%). A média de todos os ensaios situa os níveis de CO₂ entre os 2.000 e 6.000 mg/m³ (\approx 1.110 e 3.340 ppmv).

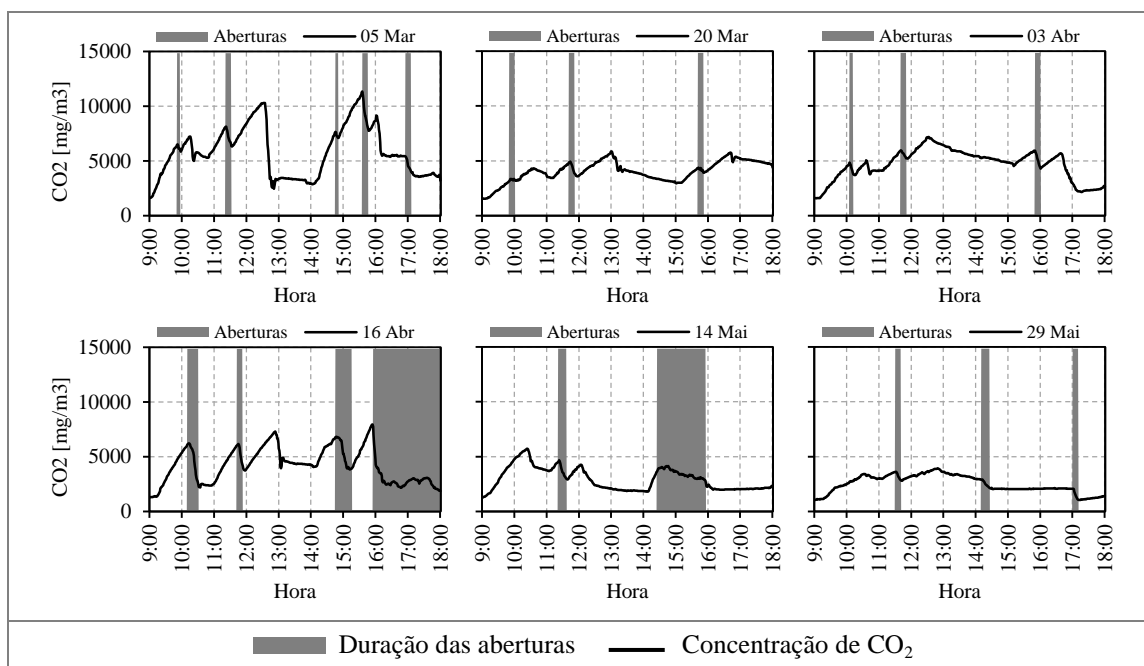


Figura 3.6 – Gráficos da variação temporal de CO₂ com duração de aberturas, nos seis ensaios realizados na sala 115.

A temperatura na sala não teve grandes variações situando-se em média entre os 20 e os 23 °C. Os gráficos da figura 3.6 mostram a variação temporal do CO₂ ao longo dos seis ensaios, acompanhado da indicação de aberturas. Tal como nas outras salas, os decréscimos não coincidentes com aberturas estão também associados à saída de ocupantes no fim de aula. A humidade relativa (ver anexo VI) também se mantém à volta dos 50% (48-54%).

Sala 117

Na sala 117 da ESTiG, no geral os níveis de CO₂ situam-se abaixo dos 10.000 mg/m³, com a possível exceção do 3º ensaio, devido à ocupação ter estado nos 70% em parte do período da tarde. Neste período houve falha no equipamento de recolha de dados e, por isso, não existem medições de CO₂. Porém, como se pode verificar o

aumento rápido a partir das 14:00 (figura 3.7) indicia que os níveis de CO₂ possam ter excedido os 10.000 mg/m³. Em termos médios o CO₂ esteve entre os 2.500 e os 4.000 mg/m³ (≈ 1.390 e 2.225 ppmv). A ocupação da sala, em média, situa-se nos 20% com maior percentagem (acima de 50%) em alguns períodos dos ensaios 1, 3 e 4.

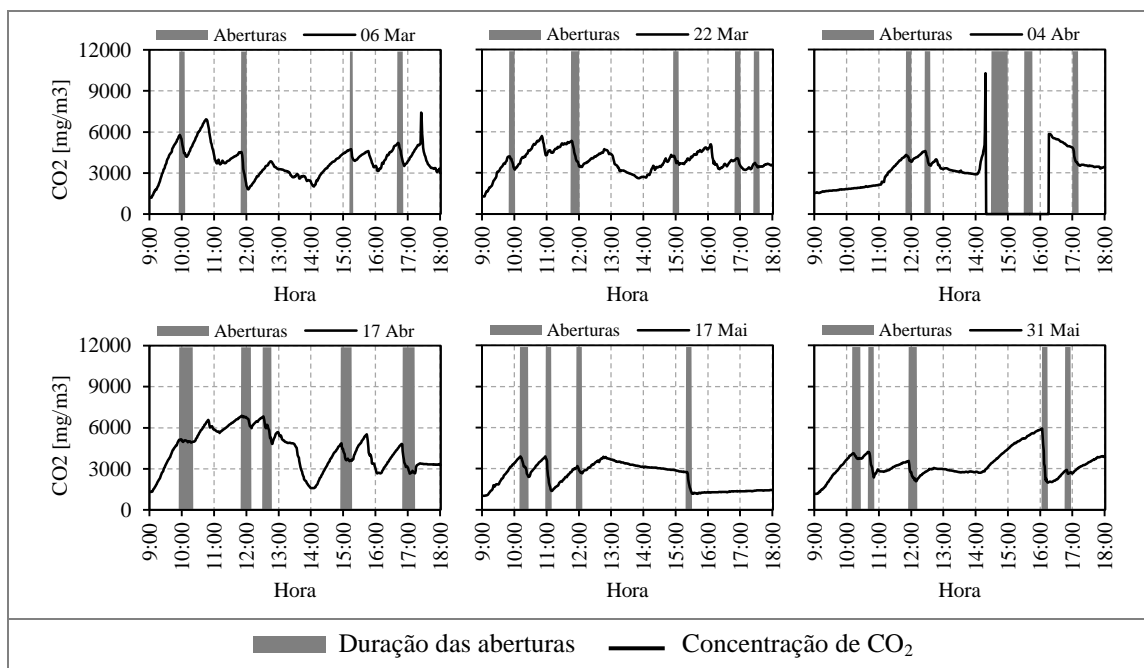


Figura 3.7 – Gráficos da variação temporal de CO₂ com duração de aberturas, nos ensaios realizados na sala 117.

A temperatura na sala situou-se, em média, entre os 22 e 23 °C, chegando por vezes aos 24 °C (ensaios 1 e 6) e aos 25 °C (ensaio 4). Ao longo dos períodos de medição e mesmo com aberturas, não houve variações significativas na evolução temporal da temperatura interior, com exceção de duas ocorrências no 5º ensaio. Às 10:55, durante 10 minutos com duas janelas e porta abertas, a temperatura desceu 2,1 °C, e por volta das 15:20 a temperatura desceu 2,2 °C com a abertura de três janelas. Ambas as ocorrências proporcionaram um decréscimo na concentração de CO₂ para níveis abaixo do limite legal. Em relação à humidade relativa (ver anexo VI), os ensaios realizados nesta sala reincidentem na mesma gama que a sala 115 (47-54%).

3.3. AVALIAÇÃO DAS TAXAS DE VENTILAÇÃO

A determinação das taxas de ventilação permitiu uma comparação muito genérica entre salas, através do caudal de ar novo médio por ocupante (tabela 3.3), e do número de renovações de ar por hora. Foi também possível determinar esses valores com e sem aberturas autocontroladas. De modo geral, a ocupação média de cada sala situa-se abaixo dos 30% o que pode amenizar a produção de CO₂ em função do volume fixo do espaço. Se for considerada a ocupação máxima para a qual foram projetadas as salas, o caudal de ar novo por ocupante é baixo relativamente aos valores recomendáveis, quer seja com aberturas ou não.

Tabela 3.3 – Ocupação, caudal de ar novo por ocupante e renovações de ar para as salas estudadas, com e sem aberturas.

Sala	Volume [m ³]	Ocupação		Caudal de ar novo médio por ocupante [m ³ /(h·ocupante)]		RPH [h ⁻¹]
		média	máxima	ocup. média	ocup. máxima	
<i>Sem aberturas</i>						
Sala G5-S3/01	166	5,7	30	18,3	3,4	0,61
Sala G3-S5/01	380	6,6	70	28,0	2,6	0,48
Sala 115	90	7,3	25	9,6	2,4	0,67
Sala 117	120	8,8	38	9,5	2,2	0,68
<i>Com aberturas</i>						
Sala G5-S3/01	166	5,7	30	77,1	13,6	2,46
Sala G3-S5/01	380	6,6	70	136,7	10,0	1,84
Sala 115	90	7,3	25	43,4	10,1	2,82
Sala 117	120	8,8	38	49,1	13,8	3,11

Na ausência de aberturas o ar em cada sala não consegue ser todo ele renovado pelo menos uma vez, o que é problemático se estivermos perante ocupação máxima. Com as aberturas autocontroladas já é possível a renovação completa do ar em pelo menos duas vezes em cada sala, com exceção da sala G3-S5/01, o que pode ter a ver com o seu volume.

Sala G5-S3/01

O gráfico seguinte (figura 3.8) mostra, para a sala G5-S3/01, a evolução temporal das renovações de ar por hora, obtidas através do caudal de ar novo que entrou na sala. No geral, obtiveram-se em média 0,6 RPH sem utilização de aberturas e cerca de 2,5 RPH durante os períodos com aberturas. Nesta sala foram realizadas aberturas simples, e combinações de diferentes tipos de abertura, podendo dizer-se que no geral as renovações de ar são mais elevadas em situações de combinação de aberturas ou em situações de abertura de porta coincidentes com o início e o fim do período de cada aula.

Em termos médios, o caudal de ar novo que se conseguiu em períodos de aberturas autocontroladas situa-se abaixo do requisito legal dos 30 m³/(h·ocupante), admitindo a taxa de ocupação máxima desse espaço, em oposição aos aproximadamente 3,4 m³/(h·ocupante), no caso de não se proceder a essa prática de ventilação.

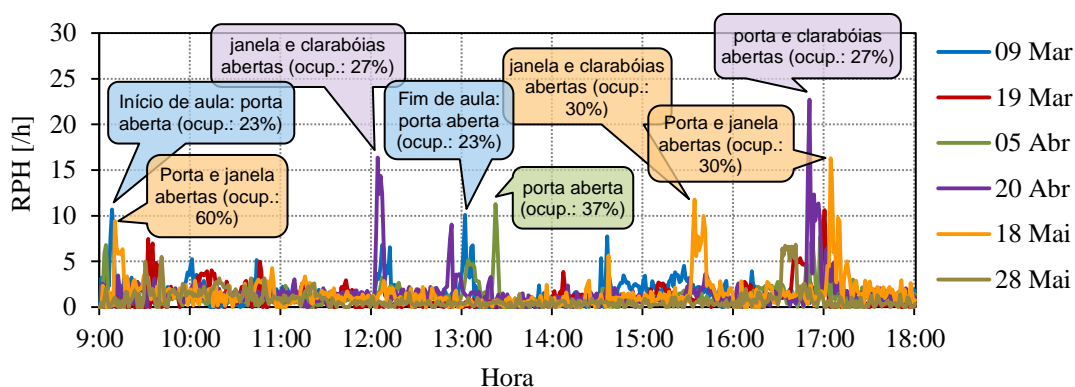


Figura 3.8 – Renovações de ar por hora com destaques para os valores mais elevados, registadas na sala G5-S3/01.

Em alguns ensaios, os caudais de ar novo e as RPH variaram bastante devido a entradas ou saídas de alunos, que não foram contabilizadas para a análise da ventilação da sala. Essas aberturas em conjunto com pequenas brechas contribuíram para a infiltração de ar. Noutros períodos as renovações atingem valores baixíssimos, o que indicia a prevalência de condições ambientais pouco favoráveis à infiltração de ar.

Sala G3-S5/01

Esta foi a sala onde se registou a maior variação das taxas de ventilação, tendo oscilado entre valores médios inferiores a 1 RPH sem aberturas autocontroladas e 1,8 RPH com aberturas de janelas e claraboias em conjunto. Em média, obtiveram-se valores da ordem das 3,2 RPH, com aberturas. A obtenção de valores de RPH inferiores são uma consequência direta da diminuição do rácio área de abertura/dimensão do espaço.

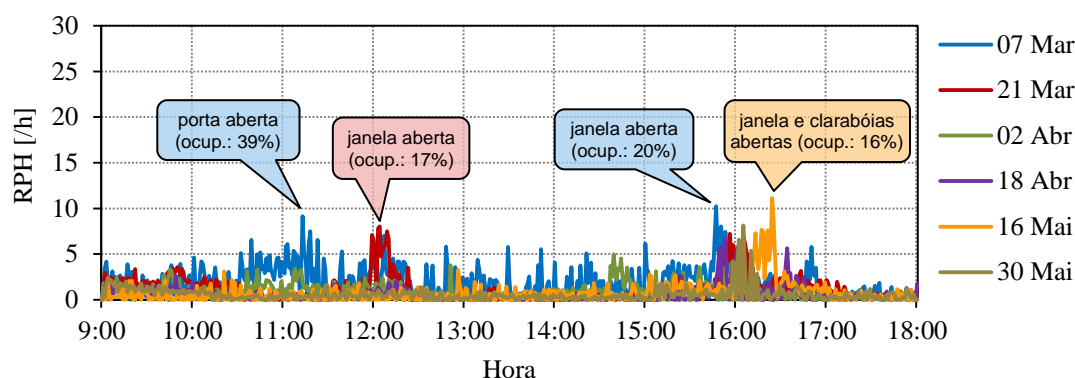


Figura 3.9 – Renovações de ar por hora com destaques para os valores mais elevados, registadas na sala G3-S5/01.

À semelhança do que se verificou para a sala G5-S3/01, também nesta sala a ventilação natural permitirá cumprir os requisitos legais referentes ao caudal de ar novo por ocupante, ainda que durante os ensaios as medidas de ventilação adotadas apenas assegurariam, em média, um caudal de ar novo de aproximadamente 10 m³/(h·ocupante), com a capacidade esgotada. Sem ventilação autocontrolada, o valor médio superou ligeiramente os 2,5 m³/(h·ocupante).

Sala 115

As renovações por hora obtidas na sala 115 (figura 3.10) situaram-se em média nas 0,6 RPH sem utilização de aberturas e 2,8 RPH com aberturas. Nesta sala foram realizadas em grande parte aberturas simples, ou seja, apenas se verificou a ventilação natural de um só lado, ou com porta ou com janelas. Não foi possível efetuar combinações de aberturas, dado que durante os ensaios ocorreram quase sempre episódios de ruído na envolvente próxima, que constituiria um fator de incomodidade, no caso de se efetuarem aberturas.

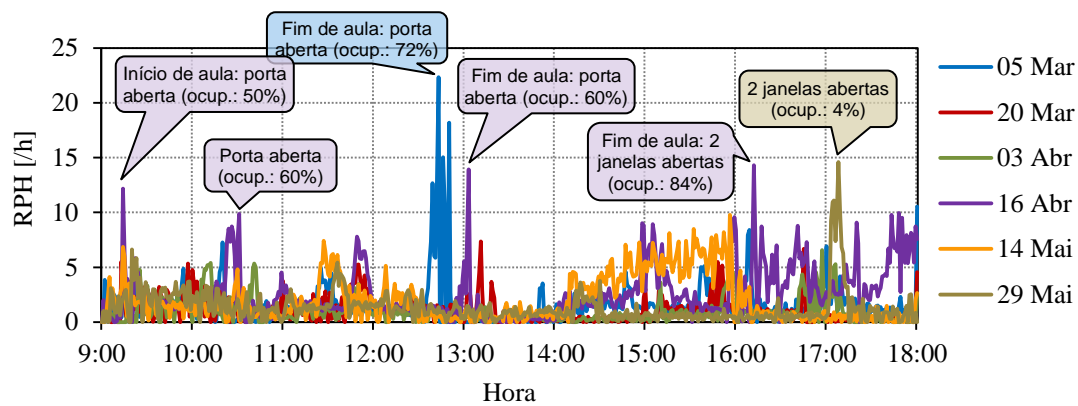


Figura 3.10 – Renovações de ar por hora com destaques para os valores mais elevados, registadas na sala 115.

Apesar desta sala se encontrar noutra edifício, não se notaram grandes diferenças em relação à renovação de ar durante períodos sem aberturas de janelas e/ou portas. Admitindo uma taxa de ocupação máxima, os valores de caudal de ar novo foram de cerca de $2,4 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ocupante})$, nas condições anteriormente referidas. Com o tipo de aberturas autocontroladas que se foram aplicando, o caudal de ar novo por ocupante, para ocupação máxima, aproximou-se em média dos $10 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ocupante})$. Porém, para algumas das condições testadas, os valores ultrapassam largamente o requisito legal para este parâmetro.

Sala 117

A sala 117 apresenta características muito semelhantes às da sala 115 no que respeita às taxas de renovação de ar. Sem aberturas, a sala tem a capacidade de renovar o ar, em média, 0,7 vezes por hora, durante os períodos em que não se procedeu a aberturas autocontroladas. Com a ocorrência deste tipo de aberturas, as renovações atingiram valores de 25 RPH com uma área de abertura de aproximadamente 4 m^2 . Em média, os períodos de abertura autocontrolada conduziram a valores de 3,1 RPH. Em termos de caudal de ar novo por ocupante, os valores obtidos aproxima-se dos descritos para a sala 115, quer para condições com ou sem aberturas de janela e/ou portas.

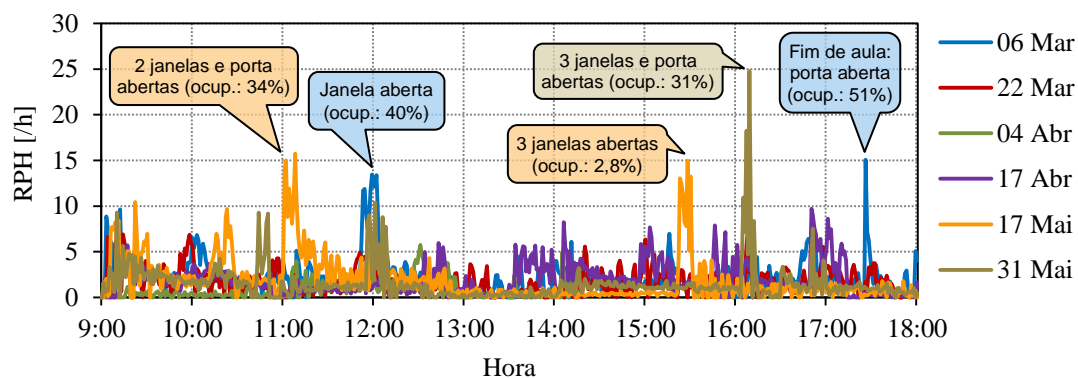


Figura 3.11 – Renovações de ar por hora com destaques para os valores mais elevados, registadas na sala 117.

Os destaques nas renovações de ar (figura 3.11) representam essencialmente períodos de alguns ensaios onde as aberturas realizadas são combinações de tipologias ou áreas de abertura superiores a 1 m².

4. FERRAMENTA DE GESTÃO DOS NÍVEIS DE CO₂ EM SALAS DE AULA

4.1. BREVE DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA

Neste capítulo apresentam-se as bases para a criação de uma ferramenta de gestão dos níveis de CO₂ em salas de aulas, que pode vir a ser utilizada num futuro próximo por docentes ou discentes. Esta ferramenta tem por base a modelação e simulação da dinâmica do CO₂ em salas de aulas.

A modelação dessa dinâmica em espaços fechados envolve alguns processos, muitos deles já referidos no capítulo anterior. No essencial, referimo-nos à produção metabólica de CO₂ e à ventilação. Todo o trabalho de modelação que se segue representa apenas o primeiro passo de um processo que se espera, venha a ter desenvolvimentos significativos num futuro próximo.

Para desenvolver esta ferramenta recorreu-se ao programa, Microsoft Excel[®] 2010, utilizado como plataforma de análise de dados e de construção da interface, em conjunto com o Microsoft Visual Basic for Applications[®] 7.0, para resolver processos mais complexos e que de outra forma seriam morosos.

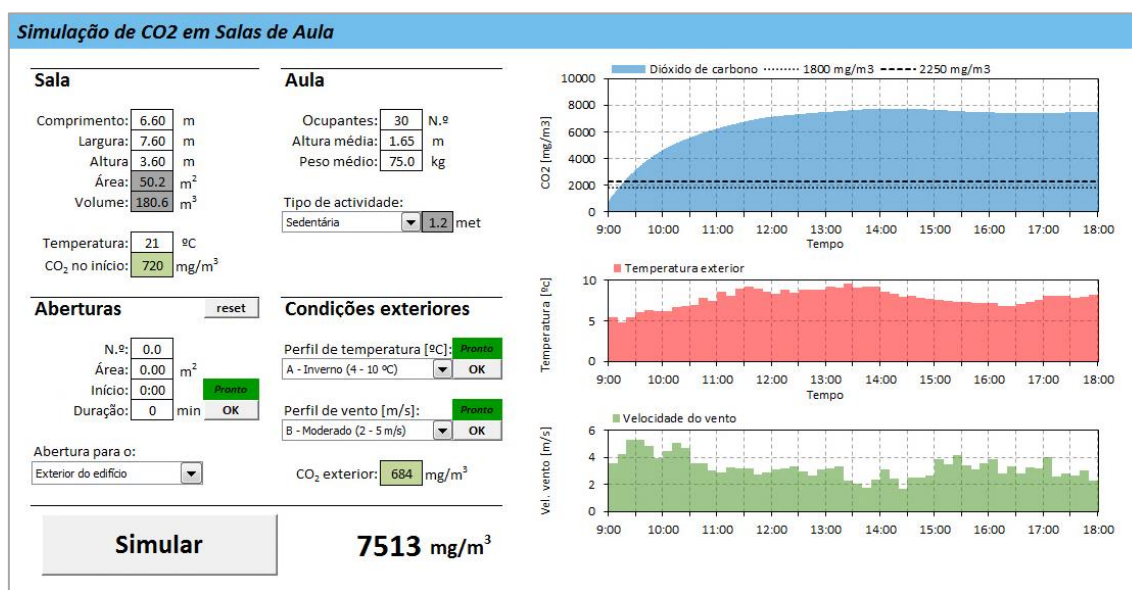


Figura 4.1 – Interface da ferramenta de gestão do CO₂ em salas de aula em Microsoft Excel[®].

A escolha do Visual Basic[®] de aplicação em Excel[®] resultou do facto deste último se tratar de um programa utilizado por quase todos os utilizadores de computadores. Esta ferramenta possui alguns controlos para ajuste do modelo, de modo a testar a sua sensibilidade em relação a alguns parâmetros. Inicialmente foi pensado numa ferramenta mais apelativa em termos de interface e executável em Windows[®], mas chegou-se à conclusão de que iria ser necessário mais tempo do que o disponível para conclusão do trabalho de dissertação. No entanto a ideia mantém-se para futuros desenvolvimentos.

4.2. SIMULAÇÃO DOS NÍVEIS DE CO₂

A simulação dos níveis de CO₂ em espaço interior baseia-se na utilização do modelo simples de caixa euleriana usado com alguma frequência na modelação da qualidade do ar ambiente (exterior). Este modelo assenta no balanço de material do contaminante num dado espaço, limitado por uma fronteira física, que integra no seu interior fontes e/ou sumidouros do poluente e que efetua trocas gasosas com a sua envolvente. Além disso, este modelo parte ainda dos seguintes pressupostos:

- As concentrações do poluente são homogéneas em toda a zona de estudo;
- A fonte e os sumidouros estão uniformemente distribuídos;
- Os poluentes emitidos misturam-se de forma uniforme e instantânea.

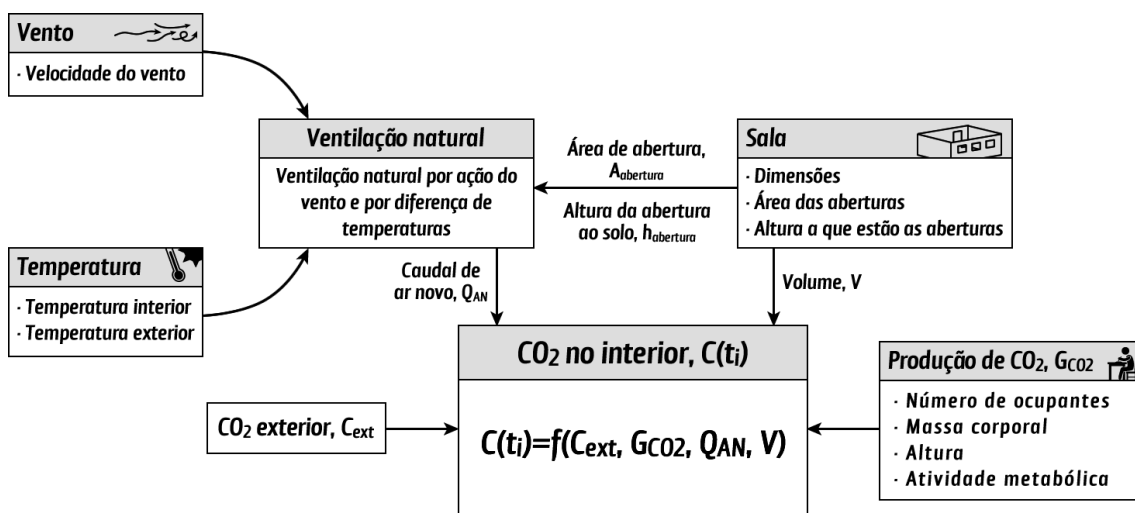


Figura 4.2 – Representação conceptual do processo de modelação.

No caso particular deste estudo, a possibilidade de remoção química e/ou absorção do poluente nas paredes e superfícies interiores, não foi considerada. Os processos considerados relevantes para o balanço material dos contaminantes estão ilustrados na figura 4.2.

Produção de CO₂ pelos ocupantes, G_{CO2}

A única fonte de CO₂ considerada no interior das salas foi a produção metabólica resultante da respiração dos ocupantes. Como já foi mencionado anteriormente (secção 3.1.4), a taxa de produção de CO₂, (G_{CO2}) dada pela equação 3.3, integra a área de DuBois (equação 3.2), a atividade metabólica e o número de ocupantes do espaço fechado. Uma pessoa emite aproximadamente 0,3 L/min de CO₂ (Matos *et al.*, 2010), considerando uma atividade metabólica de 1,2 met e A_{Du} = 1,8 m² (correspondente a um adulto de tamanho médio).

Caudal de ar novo modelado, Q_{AN_mod}

A modelação do caudal de ar novo é talvez o passo mais complexo de todo o processo de simulação de CO₂. Dada a exiguidade de tempo e atendendo aos objetivos do estudo, optou-se por recorrer a uma tipologia de modelo simples e comum na literatura. Este tipo de modelo quantifica o caudal de ar novo através de uma dada área de abertura em função da intensidade do vento e do gradiente de temperatura entre o interior e o exterior. A direção do vento é também uma variável relevante, mas não foi integrada nesta fase no modelo. A infiltração de ar que ocorre através de brechas muitas vezes não identificáveis também foi introduzida no cálculo. Assim a equação 4.6 representa o caudal de ar novo modelado.

$$Q_{AN_mod} = Q_{AN_mod_W} + Q_{AN_mod_T} + Q_{AN_mod_I} \quad [m^3/h] \quad (4.6)$$

Onde:

Q_{AN_mod}: Caudal de ar novo modelado, [m³/h];

Q_{AN_mod_W}: Caudal de ar novo modelado em função da ação do vento, [m³/h];

Q_{AN_mod_T}: Caudal de ar novo modelado em função do diferencial térmico, [m³/h];

Q_{AN_mod_I}: Caudal de ar novo modelado por infiltração, [m³/h].

O caudal de ar novo por via do efeito da ação do vento é dado pela equação 4.7 (Warren e Parkins, 1985), que engloba o efeito do vento através da velocidade, a área de

abertura, e uma constante para conversão de tempo de segundos para horas (3.600 s/1 h).

$$Q_{AN_mod_W} = 0,025 \cdot 3.600 \cdot A_{abertura} \cdot U_W \quad [m^3/h] \quad (4.7)$$

Onde:

$Q_{AN_mod_W}$: Caudal de ar novo modelado em função da ação do vento, [m³/h];

$A_{abertura}$: Área de abertura, [m²];

U_W : Velocidade do vento, [m/s].

O efeito dado pela diferença térmica é conseguido através da equação 4.8 (Van der Maas *et al.*, 1994; Awbi, 1996), que também depende da área de abertura, das temperaturas exterior e interior, da altura das aberturas em relação ao solo, da aceleração da gravidade, e do coeficiente de descarga das aberturas, que normalmente varia entre 0,6 e 0,75 (Larsen, 2006).

$$Q_{AN_mod_T} = \frac{A_{abertura}}{3} \cdot C_D \cdot \sqrt{\frac{|T_{ext}-T_{int}|}{T_{int}}} \cdot h_{abertura} \cdot g \quad [m^3/h] \quad (4.8)$$

Onde:

$Q_{AN_mod_T}$: Caudal de ar novo modelado em função do diferencial térmico, [m³/h];

$A_{abertura}$: Área de abertura, [m²];

C_D : Coeficiente de descarga das aberturas, [adim.];

T_{int} : Temperatura interior, [°C ou K];

T_{ext} : Temperatura exterior, [°C ou K];

$h_{abertura}$: Altura das aberturas em relação ao solo, [1,5 m];

g : aceleração da gravidade, [9,8 m/s²].

A equação 4.9 (Colliver, 2000; ASHRAE, 2009) permite obter uma estimativa da infiltração através da área de abertura em função da área das superfícies que constituem a sala ($2,29 \cdot 10^{-4} \text{ in}^2/\text{in}^2$) (Younes e Shdid, 2013), que também é afetada pelo diferencial térmico, e pela velocidade do vento. O fator 1,699 permite a conversão do $Q_{AN_mod_I}$ de cfm para m³/h.

$$Q_{AN_mod_I} = 1,699 \cdot A_L \cdot \sqrt{(C_S \cdot \Delta T) \cdot (C_W \cdot U_W^2)} \quad [m^3/h] \quad (4.9)$$

Onde:

$Q_{AN_mod_I}$: Caudal de ar novo modelado por infiltração, [m³/h];

A_L : Área de abertura em função da área das superfícies que constituem a sala, [in²/in²];

ΔT : Diferença entre a temperatura interior e exterior em módulo, [°F];

U_W : Velocidade do vento, [mph];

C_S : Coeficiente de efeito de chaminé, [0,015 cfm²/(in⁴·°F)];

C_W : Coeficiente de vento, [0,0065 cfm²/(in⁴·mph)]

Os parâmetros C_S e C_W podem ser encontrados em ASHRAE (2009), e usados mediante determinados critérios.

Parâmetros de avaliação dos resultados simulados

Para avaliar a qualidade dos resultados das simulações, foram utilizados alguns parâmetros estatísticos comuns (Hanna *et al.*, 1993; Borrego *et al.*, 2008). A tabela seguinte mostra os parâmetros utilizados, bem como a sua formulação e a gama de valores aceitáveis. Para o efeito foram utilizados o coeficiente de correlação, a média e variação geométricas e o índice de concordância.

O coeficiente de correlação permite identificar uma relação linear entre os valores observados e simulados de CO₂, uma vez que cada variável apresenta um número considerável de pontos (540), ou seja, vai averiguar se ao longo do tempo as duas séries variam da mesma forma e se existem desvios consideráveis.

Tabela 4.1 – Parâmetros estatísticos utilizados na avaliação dos resultados simulados.

Parâmetro	Fórmula	Valores aceitáveis	Valor ideal
Coeficiente de correlação, r	$r = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}) \cdot (S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sigma_O \cdot \sigma_S}}$	0 – 1	1,0
Média geométrica, MG	$MG = e^{(\ln \bar{O} - \ln \bar{S})}$	> 0	1,0
Variância geométrica, VG	$VG = e^{[(\ln \bar{O} - \ln \bar{S})^2]}$	> 0	1,0
Índice de concordância, d	$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{O} + O_i - \bar{O})^2}$	0 – 1	1,0

O_i e S_i representam a concentração de CO₂, observada e simulada, para o instante i.

\bar{O} e \bar{S} representam a concentração de CO₂ média, observada e simulada.

σ_O e σ_S representam o desvio padrão das concentrações de CO₂ observadas e simuladas.

A média e variação geométricas permitem que os valores extremos dos níveis de CO₂ sejam tratados de forma mais equilibrada devido à utilização do logaritmo das suas concentrações. No geral, para valores inferiores a 1 significa que o modelo sobrestima os níveis de CO₂ e para valores superiores a 1 o modelo subestima.

O índice de concordância, desenvolvido por Willmott (1981), permite avaliar o erro de previsão das simulações. Valores deste índice mais próximos de 1 indicam uma boa relação entre as variáveis. Este índice permite uma segunda leitura em relação à avaliação do coeficiente de correlação, permitindo dizer se os níveis de CO₂ variam ou não da mesma forma, sem dar tanto destaque ao desvio entre as séries de dados observados e simulados.

4.3. AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS SIMULADOS DE CO₂

Sala G5-S3/01

Nesta sala os valores simulados para a concentração de CO₂ acompanham a variação do CO₂ observado, incluindo as aberturas e pausas letivas. Apesar de a sala ser maior que as da ESTiG, aparenta ter uma mistura mais homogênea do ar no seu interior. Em todos os ensaios, o diferencial térmico é o fator que mais contribui para o caudal de ar novo. Nos primeiros 3 ensaios a diferença de temperaturas é responsável pela introdução acima de 70% de caudal de ar novo, sendo acima de 60% nos restantes ensaios, com exceção do 6º ensaio onde a introdução de ar novo pela ação do vento atinge os 45% do total do Q_{AN}.

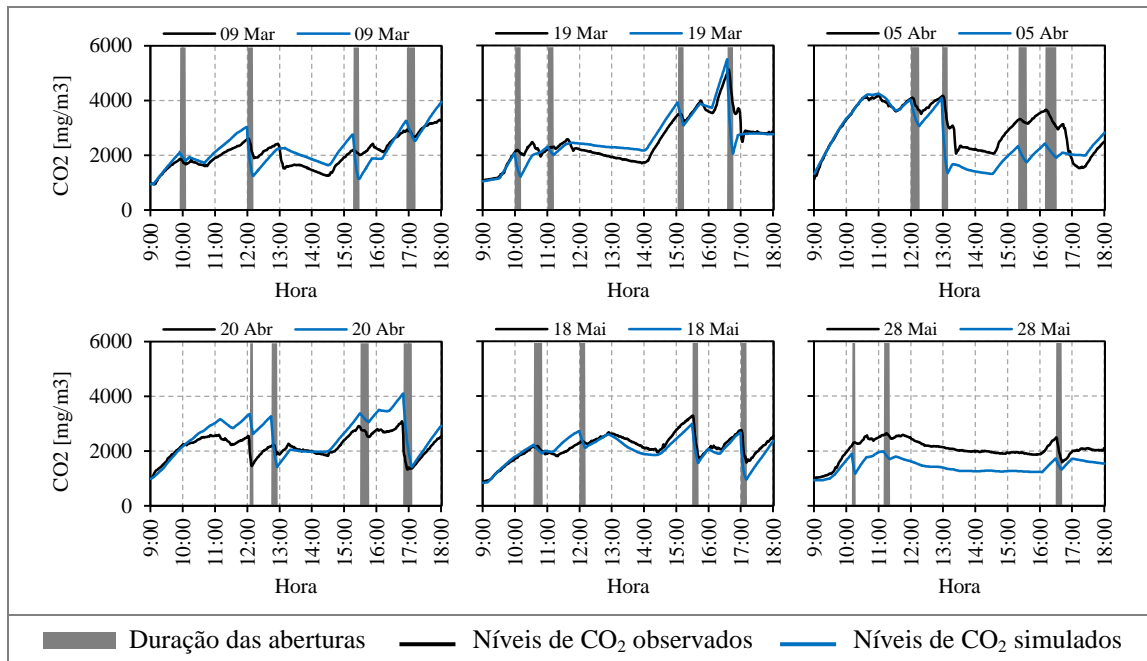


Figura 4.3 – Níveis de CO₂ observados e simulados em conjunto com a duração das aberturas para a sala G5-S3/01.

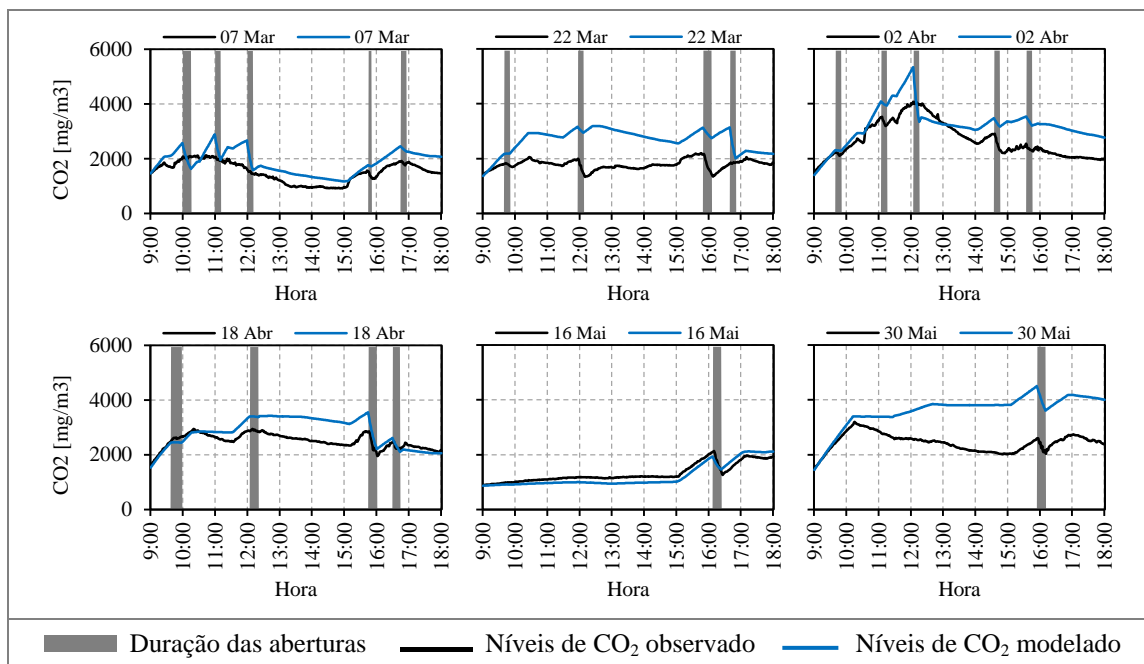
Na tabela seguinte é possível ver os valores dos parâmetros estatísticos obtidos para todos os ensaios, onde a relação entre os níveis de CO₂ observados e os níveis simulados apresentam uma relação linear. O ensaio com a correlação mais baixa foi o segundo ensaio ($r=0,79$), no entanto o índice de concordância mostra que a variação entre as concentrações foi muito semelhante. No último ensaio verifica-se um índice de concordância mais baixo o que pode ter a ver com a subestimação efetuada pelo modelo ($MG=1,41$).

Tabela 4.2 – Parâmetros estatísticos calculados para os ensaios realizados na sala G5-S3/01.

Sala G5-S3/01								
Parâmetro	Valores aceitáveis	Valor ideal	Ensaio					
			09 Mar	19 Mar	05 Abr	20 Abr	18 Mai	28 Mai
r	0-1	1,00	0,80	0,88	0,79	0,83	0,87	0,80
MG	> 0	1,00	0,95	0,98	1,19	0,88	1,05	1,41
VG	> 0	1,00	1,00	1,00	1,03	1,02	1,00	1,13
d	0-1	1,00	0,88	0,96	0,90	0,82	0,92	0,52

Sala G3-S5/01

Através dos gráficos da figura seguinte, é possível ver no geral que os valores de CO₂ simulados acompanham a evolução temporal dos valores observados. No entanto, o modelo parece descrever melhor algumas situações (ensaio 1 e 5) do que outras. A disparidade entre os dados observados e os simulados em grande parte dos ensaios pode estar associada ao facto de em determinados momentos as concentrações de CO₂ não terem sido homogêneas no interior do espaço, perdendo-se alguma representatividade espacial das medições. Esses desvios podem ainda estar associados a fenómenos locais (e.g. efeito de sombra através de árvores ou outros edifícios, turbulência), apesar da utilização de dados meteorológicos medidos a cerca de 10 metros de altura.

**Figura 4.4** - Níveis de CO₂ observados e simulados em conjunto com a duração das aberturas para a sala G3-S5/01.

No geral, nesta sala a diferença de temperatura entre o interior e o exterior foi também responsável pela introdução de mais caudal de ar novo ($\approx 60\%$). Em todos os ensaios o diferencial térmico permite a renovação do ar acima de 50% de todo o Q_{AN} .

Apesar de haver uma baixa correlação entre os valores simulados e os valores observados de CO₂ em alguns ensaios (tabela 4.3), é possível verificar que em grande parte do tempo a variação das concentrações de ambas as séries é concordante. Nos ensaios 2 e 6, o modelo sobrestima mais as concentrações de CO₂ do que nos restantes ensaios.

Tabela 4.3 – Parâmetros estatísticos calculados para os ensaios realizados na sala G3-S5/01.

Sala G3-S5/01								
Parâmetro	Valores aceitáveis	Valor ideal	Ensaio					
			07 Mar	22 Mar	02 Abr	18 Abr	16 Mai	30 Mai
r	0-1	1,00	0,85	0,03	0,75	0,72	0,95	0,18
MG	> 0	1,00	0,81	0,67	0,83	0,89	1,10	0,68
VG	> 0	1,00	1,05	1,18	1,04	1,01	1,01	1,16
d	0-1	1,00	0,76	0,55	0,95	0,96	0,96	0,82

Sala 115

A sala 115, no geral apresenta os níveis de CO₂ simulados a acompanhar a variação temporal das medições dos 6 ensaios (figura 4.5). As diferenças mais significativas estão associadas aos ensaios 1 e 4.

Mais uma vez, o diferencial térmico é o principal responsável pela renovação de ar, proporcionando à sala 63% do caudal de ar novo. No 1º ensaio a diferença térmica chegou a proporcionar em média, 72% do Q_{AN} e no 3º ensaio atingiu 82%. No 5º ensaio a ação do vento através da sua velocidade foi o fator responsável por 57% do caudal de ar novo. No último ensaio, a proporção foi de 50-50.

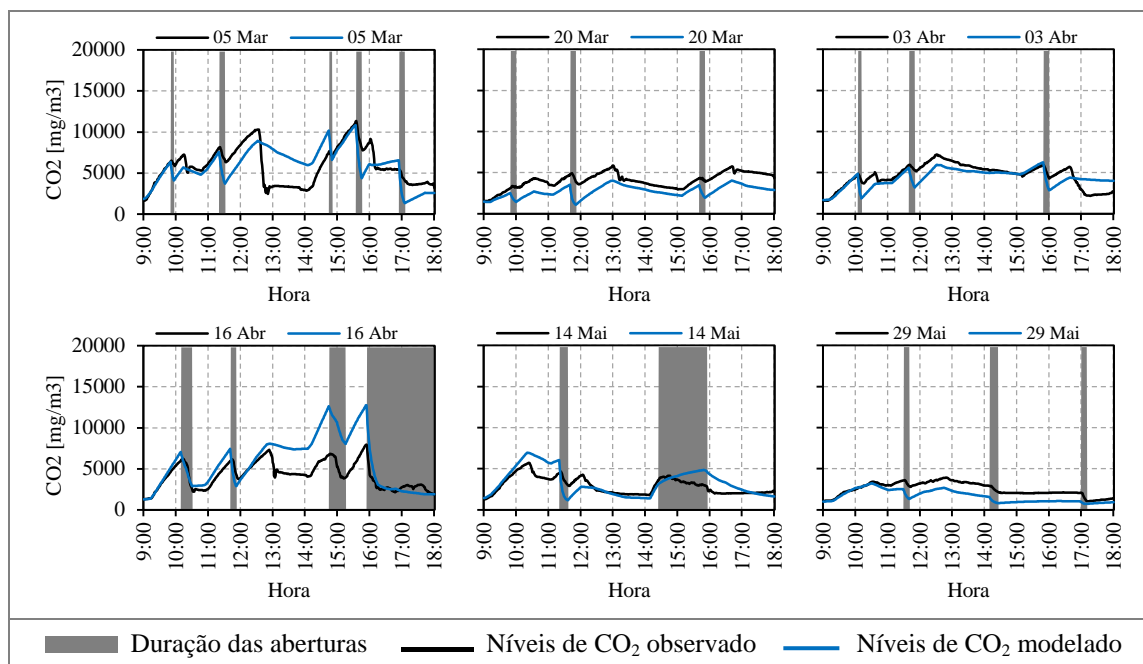


Figura 4.5 - Níveis de CO₂ observados e simulados em conjunto com a duração das aberturas para a sala 115.

Avaliando o modelo com mais rigor para esta sala (tabela 4.4), pode dizer-se que o mesmo explica linearmente alguns dos valores simulados para pelo menos 5 ensaios ($r > 0,70$).

Tabela 4.4 – Parâmetros estatísticos calculados para os ensaios realizados na sala 115.

Sala 115								
Parâmetro	Valores aceitáveis	Valor ideal	Ensaios					
			05 Mar	20 Mar	03 Abr	16 Abr	14 Mai	29 Mai
r	0-1	1,00	0,53	0,78	0,71	0,84	0,77	0,80
MG	> 0	1,00	0,99	1,48	1,06	0,81	0,94	1,58
VG	> 0	1,00	1,00	1,17	1,00	1,05	1,00	1,23
d	0-1	1,00	0,74	0,92	0,92	0,77	0,97	0,98

Nos ensaios 1 e 4 onde essa linearidade poderá ser menos evidente, o índice de concordância mostra que as concentrações de CO₂ observadas e simuladas variam de forma similar. Claramente no 4º ensaio, o modelo sobrestima os níveis de CO₂ pelo menos entre as 13 e as 16 horas. Nos ensaios 2 e 6, o CO₂ é ligeiramente subestimado ao longo de todo o período.

Sala 117

Por último, a sala 117 apresenta valores de CO₂ simulados muito próximos dos observados (figura 4.6). O modelo responde bem às aberturas e pausas letivas, apesar de por vezes sobrestimar os níveis de CO₂ e noutras ocasiões os subestimar em relação aos observados. De referir que no 3º ensaio, devido à falta de dados (14:19 às 16:15), ainda é possível ver algum acompanhamento das concentrações simuladas em relação às observadas, no início do período.

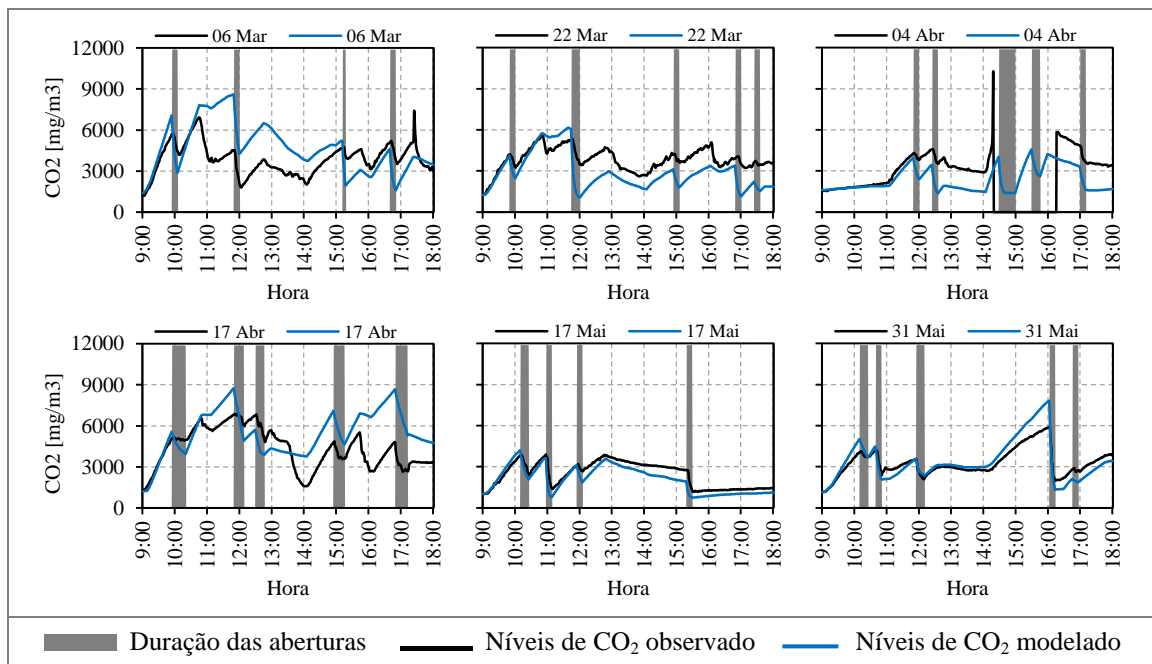


Figura 4.6 – Níveis de CO₂ observados e simulados em conjunto com a duração das aberturas para a sala 117.

Em relação ao caudal de ar novo, o vento exerceu uma importante influência na renovação de ar ($\approx 41\%$). Tal como na sala 115, apenas 1 ensaio (4º) apresenta um Q_{AN} onde 58% é da resultante da ação do vento, pois nesse dia a partir das 12 horas até ao fim do período de medição, a temperatura exterior foi quase sempre superior a 23 °C. Nesse período houve ventos provenientes de sul, ficando a sala um pouco exposta a ventos de intensidade de 2 a 4 m/s. Da mesma forma o último ensaio apresenta uma proporção de 50-50. Os restantes ensaios apresentam valores de caudal de ar novo acima dos 60% em função do diferencial térmico.

Tabela 4.5 – Parâmetros estatísticos calculados para os ensaios realizados na sala 117.

Sala 117								
Parâmetro	Valores aceitáveis	Valor ideal	Ensaio					
			06 Mar	22 Mar	04 Abr	17 Abr	17 Mai	31 Mai
r	0-1	1,00	0,32	0,72	0,04	0,45	0,93	0,94
MG	> 0	1,00	0,84	1,41	1,37	0,79	1,23	1,01
VG	> 0	1,00	1,03	1,12	1,10	1,06	1,04	1,00
d	0-1	1,00	0,50	0,68	0,70	0,70	0,98	0,94

Analisando a tabela 4.5, pode constatar-se que o modelo explica melhor os dados observados para o 5º e 6º ensaios ($r > 0,90$), ainda que no 5º ensaio o CO₂ seja um pouco mais subestimado. Os ensaios com correlação linear baixa mostram alguma concordância entre os valores observados e os valores simulados. Nos ensaios 2, 3 e 5 os valores de CO₂ são ligeiramente subestimados.

4.4. UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA

A última fase da construção da ferramenta, que permite simular concentrações de CO₂, é a etapa de testes. Para o efeito, procedeu-se à criação e avaliação de alguns cenários, aproveitando as características físicas das salas estudadas e o modo de utilização/funcionamento das mesmas.

Como se constatou durante a avaliação dos dados observados a temperatura interior não tem grandes variações e, por isso, teve sempre um valor constante ao longo de todo o período de simulação. As condições exteriores de temperatura e de velocidade do vento são dadas por escolha do utilizador. Na temperatura poder-se-á seleccionar um dos seguintes perfis, de modo a retratar condições de Inverno (4 – 10 °C), Primavera (10 – 20 °C) ou Verão (20 – 25 °C). Quanto ao vento, o utilizador tem a possibilidade de escolher um perfil de vento fraco (< 2 m/s), moderado (2 – 5 m/s) ou forte (5 – 10 m/s). De referir que os perfis de temperatura e velocidade do vento não obedecem a nenhuma categorização oficializada, e que foram escolhidos a partir dos 24 perfis existentes dos ensaios realizados.

Tabela 4.6 – Parâmetros a utilizar na simulação de cenários em função das características das salas estudadas.

Parâmetros	1	2	3	4
	180 m ³	380 m ³	90 m ³	120 m ³
Espaço interior				
Comprimento [m]	6,85	14,48	6,53	8,70
Largura [m]	7,50	7,50	5,15	5,15
Altura [m]	3,50	3,50	2,68	2,68
T _{int} [°C]	21	20	22	23
CO ₂ no início [mg/m ³]	850	800	720	684
Aberturas				
N.º	1/2 janela	1/2 janela	1 janela	3 janelas
Área total de abertura [m ²]	0,53	0,53	0,8	2,4
Início	11:00	9:00	9:00	12:00
Fim	12:00 e 14:00	18:00	18:00	16:00
Duração [min]	60 e 180	540	540	240
Ocupantes				
N.º de ocupantes	15/30	25/70	25/25	22/38
Altura média [m]	1,70	1,60	1,65	1,60
Massa corporal média [kg]	70	70	65	65
Tipo de atividade	Sedentária			
Condições exteriores				
Temperatura [°C]	10 - 20	4 - 10	4 - 10	20 - 25
Velocidade do vento [m/s]	2 - 5	5 - 10	2 - 5	< 2
CO ₂ exterior [mg/m ³]	684	700	684	684

Foram estabelecidos 4 cenários (tabela 4.6) tendo em conta os diferentes volumes das salas previamente estudadas, as respetivas capacidades de ocupação e a possibilidade de aberturas.

Cenário 1

O primeiro cenário corresponde a um volume igual ao da sala G5-S3/01, de 90 m³, onde através da abertura de metade de uma janela durante 1 hora, o nível de CO₂ sofre um decréscimo até quase o limite legal. Este cenário realizado para uma capacidade de ocupação de 50% em condições primaveris mostra que o espaço não apresentará as condições de QAI recomendáveis (figura 4.7), mesmo com a abertura efetuada. Após o fecho da janela vemos que a concentração do CO₂ sobe até quase aos 10000 mg/m³, colocando em risco a saúde dos ocupantes.

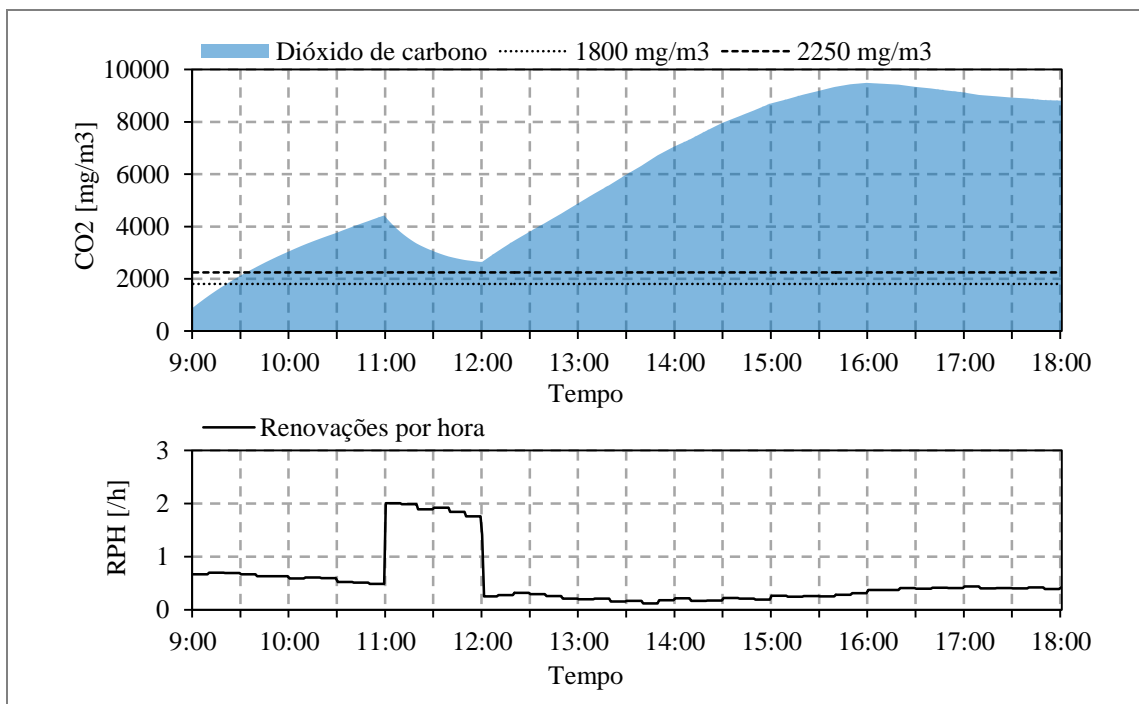


Figura 4.7 – Simulação da evolução temporal da concentração de CO₂ e renovações de ar para o cenário 1, com tempo de abertura de 1 hora, para meia janela aberta.

Neste cenário, havendo mais alguma ventilação durante as pausas letivas e pausas para almoço, os níveis de CO₂ poderão descer, mas será necessária ventilação do espaço com caudais superiores a 180 m³/h.

De seguida para complementar este cenário realizou-se outra simulação tendo em conta um tempo de abertura mais longo. Assim, mantiveram-se todas as condições do cenário com exceção da duração da abertura de metade da janela.

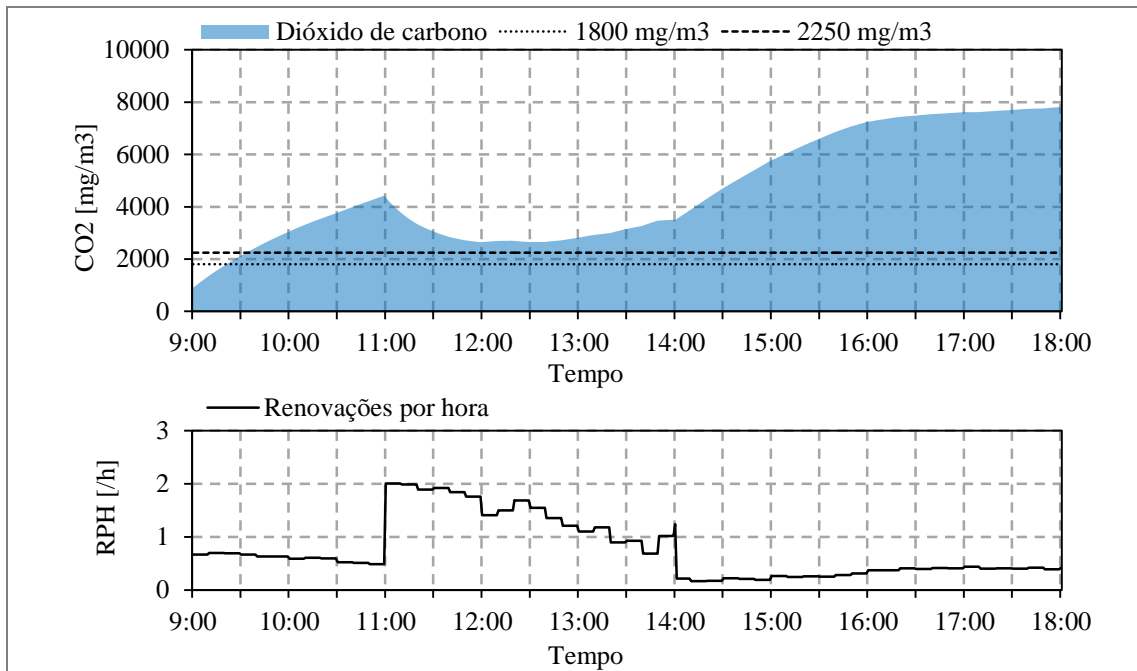


Figura 4.8 – Simulação da evolução temporal da concentração de CO₂ e renovações de ar para o cenário 1, com tempo de abertura de 2 horas e meia janela aberta.

Na figura 4.8 é possível ver que alargando o período da abertura, mas mantendo a mesma área, a concentração de CO₂ parece estagnar entre o meio-dia e as 13 horas e depois volta a subir. Isto tem a ver com as condições exteriores de temperatura, pois o diferencial térmico vai diminuindo ao longo do tempo, à medida que os valores do perfil de temperatura escolhido se aproximam mais dos 20 °C o que acontece entre as 11 e as 16 horas (ver anexo VII). Nesse período as velocidades do vento situam-se à volta dos 3 m/s o que também não ajuda nada na ventilação da sala.

Cenário 2

Este cenário adota um volume igual ao da maior sala estudada, a G3-S5/01, de 380 m³, onde através da abertura de metade de uma janela durante todo o período, é possível constatar que as concentrações de CO₂ se mantêm ao nível do limite legal. Embora em períodos de Inverno este cenário possa ser impraticável, pois pode fazer baixar a temperatura da sala, o cenário permite ver que através de uma baixa área de abertura é possível assegurar a ventilação do espaço com uma ocupação de 35%. Aqui talvez seja recomendável a renovação quase constante do ar através de ventilação natural ao longo de todo o período, ou em alternativa a utilização de um sistema mecânico.

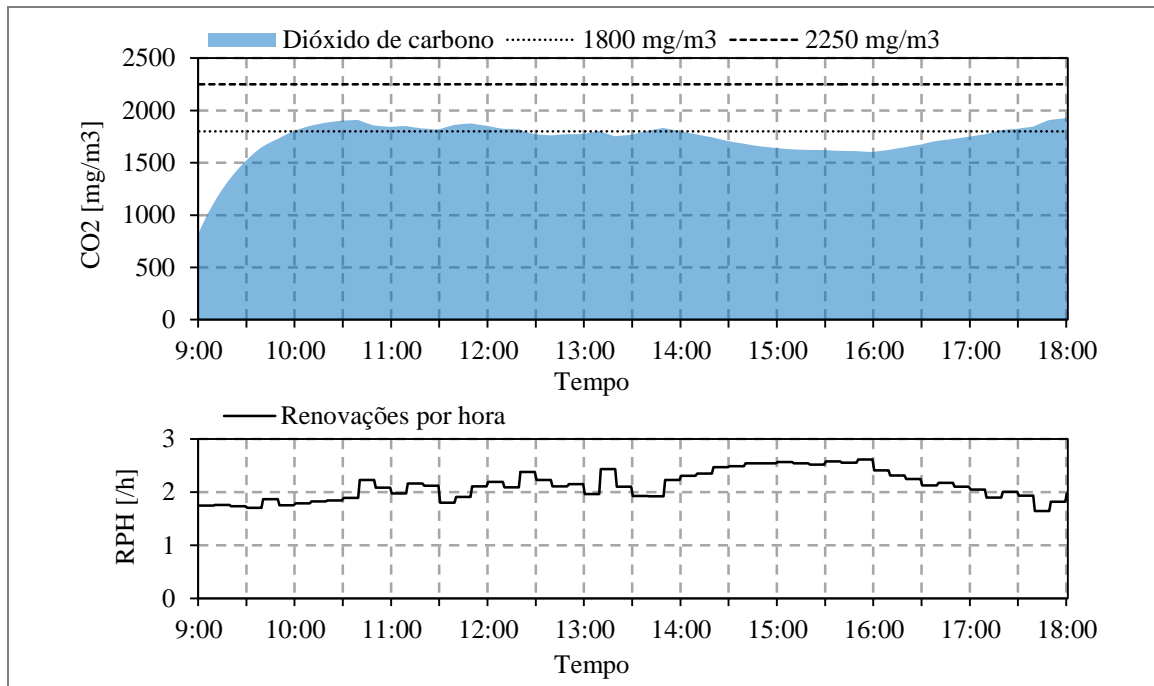


Figura 4.9 – Simulação da evolução temporal da concentração de CO₂ e renovações de ar para o cenário 2.

A figura 4.9 mostra a evolução temporal da concentração do CO₂ e das renovações de ar, onde é possível ver que através dos parâmetros considerados no cenário, a sala é ventilada em média com 2 RPH ($Q_{AN} \approx 760 \text{ m}^3/\text{h}$).

Cenário 3

O 3º cenário corresponde ao volume de sala mais baixo estudado (90 m^3), onde se pode ver (figura 4.10) que através de uma área de abertura de $0,8 \text{ m}^2$ (1 janela da sala 115), é possível obter concentrações de CO₂ ao nível do limite legal, simulando um período global com a abertura.

Este cenário foi desenhado para condições de Inverno, ou seja, para temperaturas exteriores inferiores a $10 \text{ }^\circ\text{C}$ e vento moderado ($2 - 5 \text{ m/s}$), com uma ocupação de 100% para retratar que é possível a ventilação da sala se houver turmas constituídas por mais de 20 alunos. No entanto e tal como no cenário anterior, para condições de mais frio estamos perante algo impraticável, a não ser que haja um sistema que permita a entrada de ar novo e que ao mesmo tempo aqueça o ar.

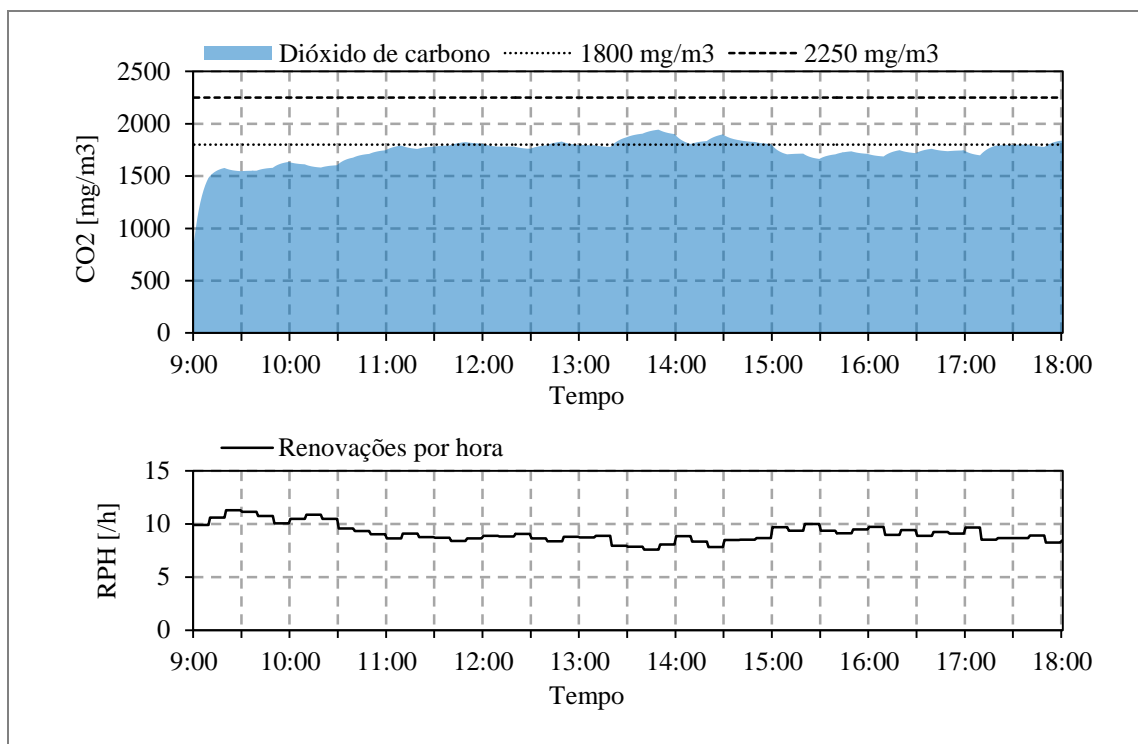


Figura 4.10 – Simulação da evolução temporal da concentração de CO₂ e renovações de ar para o cenário 3.

Para o CO₂ atingir concentrações abaixo do limite legal, é necessário que o volume de ar da sala seja renovado, em média 9 vezes por hora. Isto corresponde à introdução de um caudal de ar novo de aproximadamente 810 m³/h [32,4 m³/(h·ocupante)].

Cenário 4

Este último cenário é relativo a um volume de 120 m³, coincidente com o volume da sala 117, desenhado para uma temperatura interior de 23 °C e com condições exteriores de Verão ($20 < T_{\text{ext}} < 25$ °C e $U_w < 2$ m/s). Neste caso, como o vento é considerado fraco e o diferencial de temperaturas entre o interior e o exterior da sala é baixo, é de esperar que a quantidade de ar que entra na sala seja muito baixa. É possível constatar este facto na figura seguinte, onde o CO₂ chega a atingir cerca de 13.000 mg/m³. Este cenário apenas considera uma ocupação da sala de cerca de 60%. A abertura das 3 janelas (2,4 m²) ao meio dia permitiu que as concentrações de CO₂ descessem abaixo do limite legal. Esta parte da simulação permite constatar que apesar das condições exteriores de Verão poderem ser prejudiciais para a ventilação da sala, esta ainda é possível, mas apenas com áreas de aberturas maiores que as consideradas nos cenários anteriores.

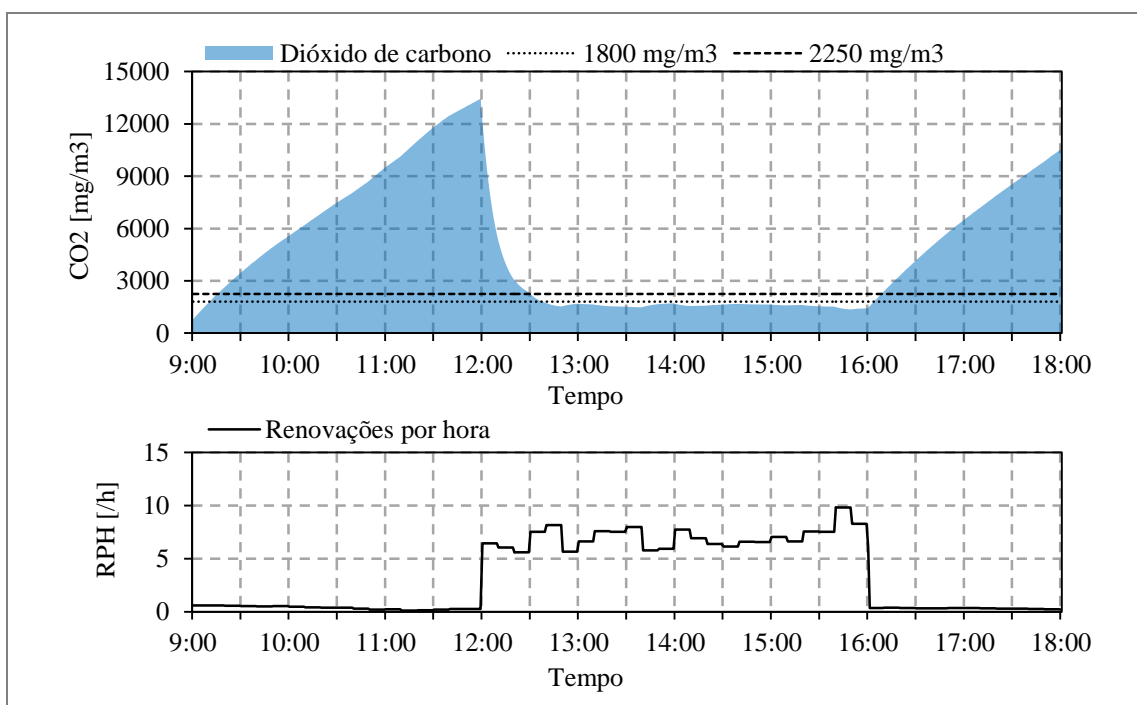


Figura 4.11 – Simulação da evolução temporal da concentração de CO₂ e renovações de ar para o cenário 4.

Durante essa abertura, as renovações do ar situaram-se em média nas 5 RPH. Com a sala fechada a infiltração de ar apenas conseguiu renovações abaixo das 0,4 RPH, correspondendo a um caudal de ar novo abaixo dos 48 m³/h.

5. CONCLUSÕES

O objetivo inicial de desenvolver um estudo experimental que traduzisse a realidade da qualidade do ar em contexto escolar foi alcançado. A monitorização dos parâmetros que afetam diretamente a QAI em espaços para atividades letivas é muito importante, pois através da sua análise permite a implementação de uma metodologia de tratamento de informação mais específica. A utilização do CO₂ como único poluente para realizar o estudo do ar interior foi a escolha óbvia, uma vez que em salas de aula é o poluente principal devido à sua produção pelos ocupantes. No entanto, trabalhar com este poluente ao nível da sua produção pelos ocupantes nos espaços interiores, não é fácil em termos de controlo, pois ocorrem muitas oscilações ao longo de um período diário. A escolha de trabalhar sobre o sistema real tem essas desvantagens, mas ao mesmo tempo permite recolher informação sobre o que realmente se passa dentro dos espaços escolares.

Em relação à avaliação dos caudais de renovação de ar, apesar de algumas limitações, foi possível alcançar resultados bastante fiáveis. Apesar de as salas da ESA garantirem um maior volume de ar por ocupante (5 – 6 m³/ocupante) em relação às da ESTiG (3 – 3,5 m³/ocupante), a ocupação do espaço é um fator essencial para determinar o caudal de ar novo por ocupante. Em média, sem abertura de janelas ou portas, a sala G3-S5/01 foi a sala com melhor capacidade de ventilação natural por ocupante (28 m³/h), seguida da sala G5-S3/01 (18 m³/h) e depois as salas da ESTiG, com cerca de 10 m³/h para as salas 115 e 117. Considerando as aberturas autocontroladas, a sala G3-S5/01 foi a que providenciou mais caudal de ar novo por ocupante com 137 m³/h, seguida da sala G5-S3/01 (77 m³/h), e depois as salas 115 e 117 (> 40 m³/h). Atualmente as turmas em qualquer nível de ensino são turmas pequenas, e por isso a capacidade máxima dessas salas raramente é alcançada. Nas salas de menor volume é onde as concentrações de CO₂ são mais elevadas e por isso a ventilação nesses espaços poderá ser mais necessária e com maior frequência durante o período diário de lecionação.

Com os valores observados de CO₂ foi possível estudar a ventilação natural de cada sala, em função do gradiente de temperatura entre o interior e o exterior, e da velocidade do vento. Em grande parte dos ensaios realizados, a ventilação natural foi afetada pelo diferencial térmico. Também foi possível constatar que esse efeito é

maximizado quando temos condições exteriores de ventos moderados ou ventos fortes. A prevalência do vento como principal fator de afetação da ventilação natural apenas foi constatada em 2 ensaios com uma representatividade de cerca de 50% de todo o caudal de ar novo, e quando o diferencial térmico era baixo ($\Delta T < 3$ °C). Em relação à temperatura interior, é possível constatar que há algumas aberturas associadas a decréscimos da mesma, em 1 ou 2 °C e que também correspondem a reduções acentuadas da concentração de CO₂, algumas vezes até para valores abaixo do limite legal. Também foi verificado que a humidade relativa no interior pode ser um bom indicador, quer da concentração do CO₂, quer do funcionamento da ventilação natural. De salientar que a correlação entre o poluente e a humidade relativa é um resultado que demonstra que são os ocupantes as principais fontes que exalam vapor de água ao mesmo tempo que CO₂. A ventilação das salas também ocorreu sem haver lugar a abertura intencional de janelas, portas ou clarabóias. Isso permitiu constatar que há existência de infiltração de ar novo em pequenas quantidades, mas que durante o período de medição permite a renovação do ar.

A construção do modelo de simulação das concentrações de CO₂ e da respetiva ferramenta de gestão com uma interface amigável para o utilizador permitiu verificar a influência de várias variáveis na acumulação de CO₂ ao longo do período de medição e ajudar a obter respostas a determinadas questões que se impõem numa perspetiva de gestão preventiva da qualidade do ar desses espaços. Desenvolveram-se vários cenários que proporcionaram informação relevante acerca do modo como espaços idênticos aos estudados podem ser geridos, para que os seus ocupantes não sejam expostos a níveis elevados do principal contaminante.

Futuros desenvolvimentos serão necessários para uma descrição mais completa dos aspetos de QAI em espaços escolares, onde o principal problema esteja relacionado com os níveis elevados de CO₂, ou com outros poluentes que possam até ser mais tóxicos em menores concentrações. A ventilação natural irá contribuir para que qualquer edifício possa reduzir o seu dispêndio energético, mas dependerá sobretudo de uma boa gestão da ventilação, de modo a que as condições exteriores tenham o menor impacto no conforto dos ocupantes. Assim, estamos certos de que este estudo poderá ser um importante contributo para a sustentabilidade dos edifícios, protegendo a saúde dos ocupantes e melhorando a sua produtividade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abt, E., Suh, H. H., Allen, G., Koutrakis, P. (2000). *Characterization of indoor particle sources: a study conducted in the metropolitan Boston area*. Environmental Health Perspectives, 108(1): 35-44.
- Alloca, C., Chen, Q., Glicksman, L.R. (2003). *Design analysis of single-sided natural ventilation*. Energy and Buildings, 35(8): 785-795.
- Al-Rashidi, K., Loveday, D., Al-Mutawa, N. (2012). *Impact of ventilation modes on carbon dioxide concentration levels in Kuwait classrooms*. Energy and Buildings, 47: 540-549.
- ASHRAE. (2009). *ASHRAE 2009 Handbook of Fundamentals*. Inch-Pound Edition. ISBN: 978-1-933742-54-0. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2010). *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2010. ISSN: 1041-2336. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2011). *ASHRAE Position Document on Indoor Air Quality*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ATSDR. (1990). *Toxicological Profile for Radon*. U.S. Public Health Service, in collaboration with U.S. Environmental Protection Agency. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, December 1990.
- Bai, Z., You, Y., Gao, X., Yu, H., Yan, L., Zhu, T. (2007). *Comparison of time-activity patterns in different periods in Tianjin, China*. Epidemiology, 17(6): S454.
- Bartlett, K.H., Martinez, M., Bert, J. (2004). *Modeling of Occupant-Generated CO₂ Dynamics in Naturally Ventilated Classrooms*. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 1: 139-148.
- Bergman, T.L., Dewitt, D.P., Incropera, F.P., Lavine, A.S. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7th Edition. ISBN: 978-0470-50197-9. John Wiley & Sons, Inc.
- Boice, J. D., Tarone, R. E. (2011). *Cell Phones, Cancer, and Children*. JNCI, Journal of the National Cancer Institute, 103(16): 1211-1213. Oxford University Press.
- Bornehag, C.G., Sundell, J., Sigsgaard, T. (2004). *Dampness in buildings and health (DBH): Report from an ongoing epidemiological investigation on the association between indoor environmental factors and health effects among children in Sweden*. Indoor Air, 14 (s7): 59-66.
- Borrego, C., Monteiro, A., Ferreira, J., Miranda, A.I., Costa, A.M., Carvalho, A.C., Lopes, M. (2008). *Procedures for estimation of modelling uncertainty in air quality assessment*. Environment International, 34(5): 613-620.
- Boyer, H., Lauret, A.P., Adelard, L., Mara, T.A. (1999). *Building ventilation: a pressure airflow model computer generation and elements of validation*. Energy and Buildings, 29(3): 283-292.
- Burroughs, H. E., Hansen, S. J. (2011). *Managing Indoor Air Quality*. 5th Edition. ISBN: 978-1-4398-7014-3. Taylor & Francis, Ltd.

- Caciolo, M., Stabat, P., Marchio, D. (2011). *Full scale experimental study of single-sided ventilation: Analysis of stack and wind effects*. Energy and Buildings, 43(7): 1765-1773.
- Carneiro, P., Ferreira, P. (2012). *The Economic, Environmental and Strategic Value of Biomass*. Renewable Energy, 44: 17-22.
- CIBSE. (2005a). *Guide B - Heating, ventilating, air conditioning and refrigeration*. ISBN: 1-903287-58-8. The Chartered Institution of Building Services Engineers Publications.
- CIBSE. (2005b). *Natural Ventilation in Non-domestic Buildings*. Applications Manual AM 10. ISBN: 1-903287-56-1. The Chartered Institution of Building Services Engineers Publications. London, UK.
- Colliver, D.G. (2000). *A predictive method to determine the leakage area needed in residences for IAQ control by infiltration*. Dublin 2000: 20 20 Vision, The Chartered Institution of Building Services Engineers Conference.
- Chu, C., Chiang, B. (2013). *Wind-driven cross ventilation with internal obstacles*. Energy and Buildings, 67: 201-209.
- Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J. M., Baysson, H., Bochicchio, F. *et al.* (2005). *Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies*. BMJ 330, 223. Epub 2004 Dec 21.
- Davidrajuh, R. (2009). *A Model for Greener Power Generation for North-east Sri Lanka based on Stand-alone Renewable Energy Systems*. In: Hamons, T. J. (ed.). Renewable Energy. (pp 1-16). ISBN: 978-953-7619-52-7. InTech Publication.
- Decisão 91/565/CEE, do Conselho, de 29 de Outubro de 1991, relativa à promoção do rendimento energético na Comunidade, estabelecendo o programa *Save* (Acções específicas destinadas à obtenção de um alto rendimento energético). Jornal Oficial das Comunidades Europeias. N.º L 307 (08/11/1991), 34-36.
- Decreto-lei n.º 156/92, de 27 de Julho, revogado pelo Decreto-lei n.º 118/98, de 7 de Maio, relativo às regras a observar no dimensionamento e instalação dos sistemas energéticos de climatização em edifícios e as condições a observar nos mesmos. Diário da República. 1ª Série (A), N.º 173. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações.
- Decreto-Lei n.º 78/2006, de 4 de Abril, que transpõe parcialmente a Diretiva 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro, relativo ao desempenho energético e qualidade do ar interior em edifícios, e que aprova o Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE). Diário da República. 1ª Série (A), N.º 67. Ministério da Economia e da Inovação.
- Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de Abril, que transpõe parcialmente a Diretiva 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro, relativo à definição de eficiência e características mínimas dos sistemas de climatização e qualidade do ar interior em edifícios, e que aprova o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE). Diário da República. 1ª Série (A), N.º 173. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações.

- Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de Abril, que transpõe parcialmente a Diretiva 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro, relativo à definição de padrões de qualidade energético-ambiental da construção, e que aprova o Regulamento das Características de Conforto Térmico dos Edifícios (RCCTE). Diário da República. 1ª Série (A), N.º 173. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações.
- Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de Agosto, que transpõe a Diretiva 2010/31/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Dezembro, relativo à aprovação do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). Diário da República. 1ª Série, N.º 159. Ministério da Economia e do Emprego.
- Despacho n.º 10250/2008, de 8 de Abril, que aprova o modelo dos Certificados de Desempenho Energético e da Qualidade do Ar emitidos no âmbito do SCE. Diário da República. 2ª Série, N.º 69. Ministério da Economia e da Inovação - Direcção-Geral de Energia e Geologia.
- Destailats, H., Maddalena, R.L., Singer, B.C., Hodgson, A.T., McKone, T.E. (2008). *Indoor pollutants emitted by office equipment: A review of reported data and information needs*. Atmospheric Environment, 42(7): 1371-1388.
- Diretiva 93/76/CEE, do Conselho, de 13 de Setembro, relativa à limitação das emissões de dióxido de carbono através do aumento da eficácia energética (*Save*). Jornal Oficial das Comunidades Europeias. N.º L 237 (22/09/1993), 28-30.
- Diretiva 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro, relativa ao desempenho energético dos edifícios. Jornal Oficial das Comunidades Europeias. N.º L 1 (04/01/2003), 65-71.
- Diretiva 2010/31/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Dezembro, relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). Jornal Oficial da União Europeia. N.º L 153 (18/06/2010), 13-35.
- EEA. (2013). *Environment and human health*. Report 5/2013. Luxembourg: Publications Office of the European Union. ISSN: 1725-9177. ISBN: 978-92-9213-392-4. European Environmental Agency.
- EN ISO 16000-1:2004. Indoor air. Part 1: General aspects of sampling strategy. 13.040.20: Ambient atmospheres. International Organization for Standardization.
- EN ISO 16000-5:2007. Indoor air. Part 5: Sampling strategy for volatile organic compounds (VOCs). 13.040.20: Ambient atmosphere. International Organization for Standardization.
- EPA. (2003). *A Standardized EPA Protocol for Characterizing Indoor Air Quality in Large Office Buildings*. Indoor Environments Division, Office of Radiation and Indoor Air. Washington DC 20460, USA; Atmospheric Research and Exposure Assessment Laboratory, Office of Modeling, Monitoring Systems, and Quality Assurance. Research Triangle Park, NC 27711, USA. U.S. Environmental Protection Agency.
- EPA. (2012). *A Citizen's Guide to Radon: the Guide to Protecting Yourself and Your Family from Radon*. EP 402/K-12/002 (May 2012). Indoor Environments Division (6609J). U.S. Environmental Protection Agency. www.epa.gov/radon.

- Etheridge, D. (2012). *Natural Ventilation of Buildings: Theory, Measurement and Design*. ISBN: 978-0-470-66035-5. John Wiley & Sons, Inc.
- Gładyszewska-Fiedoruk, K., Gajewski, A. (2012). *Effect of wind on stack ventilation performance*. *Energy and Buildings*, 51: 242-247.
- GrayWolf. (2013). *Advanced Environmental Instrumentation*. GrayWolf®, Sensing Solutions. www.wolfsense.com.
- Griffiths, M., Eftekhari, M. (2008). *Control of CO₂ in a naturally ventilated classroom*. *Energy and Buildings*, 40 (2008): 556-560.
- Hanna, S.R., Chang, J.C., Strimaitis, D.G. (1993). *Hazardous gas model evaluation with field observations*. *Atmospheric Environment*, 27A(15): 2265-2285.
- Hess-Kosa, K. (2011). *Indoor air Quality: The Latest Sampling and Analytical Methods*. 2nd Edition. ISBN: 978-1-4398-2666-9. CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC.
- Hussen, A. M. (2004). *Principles of Environmental Economics*. 2nd Edition. eISBN: 0-203-50742-8. Routledge, Taylor & Francis Group. New York, USA.
- INE, I.P. (2012). *Censos 2011: Resultados Definitivos*. ISBN: 978-989-25-0181-9. Instituto Nacional de Estatística, I.P. Lisboa, Portugal.
- INE/DGEG. (2011). *Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010*. ISBN: 978-989-25-0130-7. Instituto Nacional de Estatística, I.P./ Direcção-Geral de Energia e Geologia. Lisboa, Portugal.
- Jones, A.P. (1999). *Indoor air quality and health*. *Atmospheric Environment*, 33(28): 4535-4564.
- Khan, N., Su, Y., Riffat, S.B. (2008). *A review on wind driven ventilation techniques*. *Energy and Buildings*, 40(8): 1586-1604.
- Larsen, T.S. (2006). *Natural Ventilation Driven by Wind and Temperature Difference*. PhD Thesis. Department of Civil Engineering, Aalborg University. ISSN: 1901-7294. Aalborg, Denmark.
- Larsen, T.S., Heiselberg, P. (2008). *Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference*. *Energy and Buildings*, 40(6): 1031-1040.
- Lee, S. C., Chang, M. (2000). *Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong*. *Chemosphere*, 41(2000): 109-113.
- Li, Y., Leung, G. M., Tang, J. W., Yang, X., Chao, C. Y. H., Lin, J. Z., et al. (2007). *Role of Ventilation in Airborne Transmission of Infectious Agents in the Built Environment – a Multidisciplinary Systematic Review*. *Indoor Air*, 17: 2-18.
- Matos, J., Brantes, J., Cunha, A.M.A. (2010). *Qualidade do Ar em Espaços Interiores - Um Guia Técnico*. Agência Portuguesa do Ambiente, Maio de 2010. Amadora, Portugal.
- Mendell. M. J., Mirer, A. G., Cheung, K., Tong, M., Douwes, J. (2011). *Respiratory and Allergic Health Effects of Dampness, Mold, and Dampness-Related Agents: A Review of the Epidemiologic Evidence*. *Environmental Health Perspectives*, 119(6): 748-756.

- Miller, J. D. (2011). *Health effects from mold and dampness in housing in western societies: early epidemiology studies and barriers to further progress*. In: Adan, O. C. G., Samson, R. A. (eds). *Fundamentals of Mold Growth in Indoor Environments and Strategies for Healthy Living*. ISBN: 978-90-8686-135-4. Wageningen Academic Publishers. The Netherlands.
- Park, J., Jang, Y., Ahn, Y., Cheong, S., Lee, J. (2008). *Estimation of appropriate capacity of ventilation system based on the air infiltration rate in Korean classrooms*. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22: 788-797.
- Pepper, D. W., Carrington, D. (2009). *Modeling Indoor Air Pollution*. ISBN: 978-1-84816-324-9. Imperial College Press. London, UK.
- Portaria n.º 461/2007, de 5 de Junho, relativa à calendarização da aplicação do sistema de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior (SCE). Diário da República. 2ª Série, N.º 108. Ministérios da Administração Interna, do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, da Economia e da Inovação e das Obras Públicas, Transportes e Comunicações.
- Portaria n.º 353-A/2013, de 4 de Dezembro, que estabelece os valores mínimos de caudal de ar novo por espaço, bem como os limiares de proteção e as condições de referência para os poluentes do ar interior mediante determinados critérios. Diário da República. 1ª Série, N.º 235. Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.
- Qin, Q., Han, L., Chen, Y., Fu, T. (2012). *Preliminary Report on the Indoor Electromagnetic Radiation in a Municipality of Western P.R. China: Up-to-Now Still within the Range*. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 4(5): 199-205.
- Rogers, S. A. (1987). *Diagnosing the Tight Building Syndrome*. *Environmental Health Perspectives*, 76: 195-198.
- Rostron, J. (1997). *Sick Building Syndrome: Concepts, issues and practice*. ISBN: 0-419-21530-1. E & FN Spon Press. London, UK & New York, USA.
- SCHER. (2007). *Opinion on Risk Assessment on Indoor Air Quality*. 29 May 2007. Scientific Committee on Health and Environmental Risks. European Commission.
- Shen, X., Zhang, G., Bjerg, B. (2012). *Comparison of different methods for estimating ventilation rates through wind driven ventilated buildings*. *Energy and Buildings*, 54: 297-306
- Sundell, J. (2004). *On the history of indoor air quality and health*. *Indoor Air*, 14 (Suppl. 7): 51-58.
- Van der Maas, J., Hensen, J. L. M., Roos, A. (1994). *Ventilation and energy flow through large vertical openings in buildings*. *Proceedings of the 15th AIVC Conference*, Buxton, UK. Vol. 1: 289-302.
- Verbeke, J., Cools, R. (1995). *The Newton-Raphson method*. *Int. J. Mathematical Education*, 26(2): 177-193.
- Warren, P.R., Parkins, L.M. (1985). *Single-sided ventilation through open windows*. In: *Conference Proceedings: Thermal performance of the exterior envelopes of buildings*, Florida, ASHRAE SP 49: 209-228.

- WHO. (2000). *Air Quality Guidelines for Europe*. 2nd Edition. ISBN: 978-92-890-1358-3. WHO Regional Publications, European Series, No. 91. Regional Office for Europe. World Health Organization, Copenhagen.
- WHO. (2009a). *WHO Guidelines for Indoor Air Quality: dampness and mould*. ISBN: 978-92-890-4168-3. WHO Regional Publications. Regional Office for Europe. World Health Organization, Copenhagen.
- WHO. (2009b). *Damp and Mould: Health risks, prevention and remedial actions*. Information brochure. WHO Regional Publications. Regional Office for Europe. World Health Organization, Copenhagen.
- Willmott, C.J. (1981). *On the validation of models*. Physical Geography, 2(2): 184-194.
- Wolkoff, P. (2013). *Indoor air pollutants in office environments: Assessment of comfort, health, and performance*. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 216(4): 371-394.
- Younes, C., Shdid, C.A. (2013). *A methodology for 3-D multiphysics CFD simulation of air leakage in building envelopes*. Energy and Buildings, 65: 146-158.
- Zito, R. (2010). *Energy Storage: A New Approach*. ISBN: 978-0-470-62591-0. Scrivener Publishing LLC and John Wiley & Sons, Inc.

ANEXOS

Anexo I: Inquérito à Qualidade do Ar e Conforto Térmico Interiores.

Anexo II: Representação geométrica das salas monitoradas na ESA e na ESTiG.

Anexo III: Ficha de registo para cada ensaio.

Anexo IV: Gráficos da evolução temporal da temperatura e humidade relativa interiores e área de abertura, em cada ensaio.

Anexo V: Gráficos da evolução temporal da temperatura e humidade relativa interiores e ocupação, em cada ensaio.

Anexo VI: Gráficos da evolução temporal da concentração de CO₂ e da humidade relativa interiores, em cada ensaio.

Anexo VII: Perfis de temperatura exterior e de velocidade do vento utilizados no delineamento de cenários.

Anexo I

Inquérito à Qualidade do Ar e Conforto Térmico Interiores.

Inquérito à Qualidade do Ar e Conforto Térmico Interior

Este inquérito é realizado no âmbito da dissertação em “Avaliação da Qualidade do Ar Interior em Salas de Aulas sem Sistemas AVAC”, para obtenção do grau de Mestre em Tecnologia Ambiental. Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Bragança. Todas as informações respondidas neste inquérito serão tratadas com **anonimato dos participantes**.

1. Informação pessoal

1.1. <u>Sexo</u> :	1.2. <u>Idade</u> :	1.3. <u>Altura</u> :	1.4. <u>Peso</u> :
Masculino <input type="checkbox"/>	18 – 30..... <input type="checkbox"/>	Menos de 1,40 m <input type="checkbox"/>	Menos de 65 kg <input type="checkbox"/>
Feminino..... <input type="checkbox"/>	31 – 45..... <input type="checkbox"/>	1,41 – 1,60 m <input type="checkbox"/>	66 – 80 kg..... <input type="checkbox"/>
	46 – 65..... <input type="checkbox"/>	1,61 – 1,80 m <input type="checkbox"/>	81 – 100 kg..... <input type="checkbox"/>
	Mais de 65..... <input type="checkbox"/>	Mais de 1,80 m <input type="checkbox"/>	Mais de 100 kg..... <input type="checkbox"/>
1.5. <u>Tem problemas de saúde?</u>		1.6. <u>Durante a aula apresentou algum dos sintomas abaixo?</u>	
Respiratórios..... <input type="checkbox"/>	Outros..... <input type="checkbox"/>	Irritação do nariz..... <input type="checkbox"/>	Irritação dos olhos <input type="checkbox"/>
Cardíacos..... <input type="checkbox"/>	Quais?	Garganta seca..... <input type="checkbox"/>	Dor de cabeça..... <input type="checkbox"/>
Oftalmológicos..... <input type="checkbox"/>	Nenhum..... <input type="checkbox"/>	Rouquidão..... <input type="checkbox"/>	Outro <input type="checkbox"/>
		Tosse..... <input type="checkbox"/>	Qual?
		Ardor nos olhos <input type="checkbox"/>	Nenhum <input type="checkbox"/>

2. Informação sobre o espaço

2.1. <u>Período semanal que passa em salas como esta:</u>	2.2. <u>Onde esteve sentado durante esta aula:</u>		
Menos de 1 hora <input type="checkbox"/>	Entre 3 e 6 horas..... <input type="checkbox"/>	Perto da janela à frente <input type="checkbox"/>	Longe da janela à frente <input type="checkbox"/>
Entre 1 e 3 horas <input type="checkbox"/>	Mais de 6 horas <input type="checkbox"/>	Perto da janela atrás <input type="checkbox"/>	Longe da janela atrás..... <input type="checkbox"/>
		Perto da janela no meio.... <input type="checkbox"/>	Longe da janela no meio <input type="checkbox"/>

3. Conforto

LEGENDA -2 Muito frio -1 Frio 0 Confortável 1 Quente 2 Muito quente

3.1. <u>Sensação térmica:</u>	-2	-1	0	1	2
Como se sentiu durante a(s) abertura(s) da janela ou porta?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Como se sente neste momento?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Como se sentiu durante todo o período de aula?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.2. <u>Temperatura na sala:</u>					
Que temperatura acha que teve a sala durante o período da aula?	<input type="text"/> °C				
O que acha que aconteceu à temperatura durante a(s) abertura(s)?.....	Diminuiu <input type="checkbox"/>	Manteve-se <input type="checkbox"/>	Aumentou <input type="checkbox"/>		

4. Informação sobre o ambiente interior

LEGENDA -2 Nunca -1 Raramente 0 Às vezes 1 Frequentemente 2 Sempre

<u>Durante a aula(s) ocorreu/houve:</u>	-2	-1	0	1	2
Ar seco ou pesado.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ambiente frio.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ambiente quente.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Correntes de ar.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Poeiras no interior.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Odores agradáveis.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Odores desagradáveis.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

5. Apreciação global

LEGENDA -2 Nunca -1 Raramente 0 Às vezes 1 Frequentemente 2 Sempre

	-2	-1	0	1	2
No geral, as salas onde tem aulas apresentam conforto térmico aceitável?.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
No geral, as salas onde tem aulas apresentam qualidade do ar aceitável?.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Na sua opinião, o conforto térmico e a qualidade do ar interior têm afectado a sua produtividade nas aulas?.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

6. Comentários/Recomendações

Se acha que deve ser dada atenção a informações relevantes não abordadas neste questionário, relacionadas com o tema, por favor não hesite em reportá-las.

Obrigado!

Anexo II

Representação geométrica das salas monitoradas na ESA e na ESTiG.

1.

Local: Escola Superior Agrária do IPB

Sala: G5-S3/01

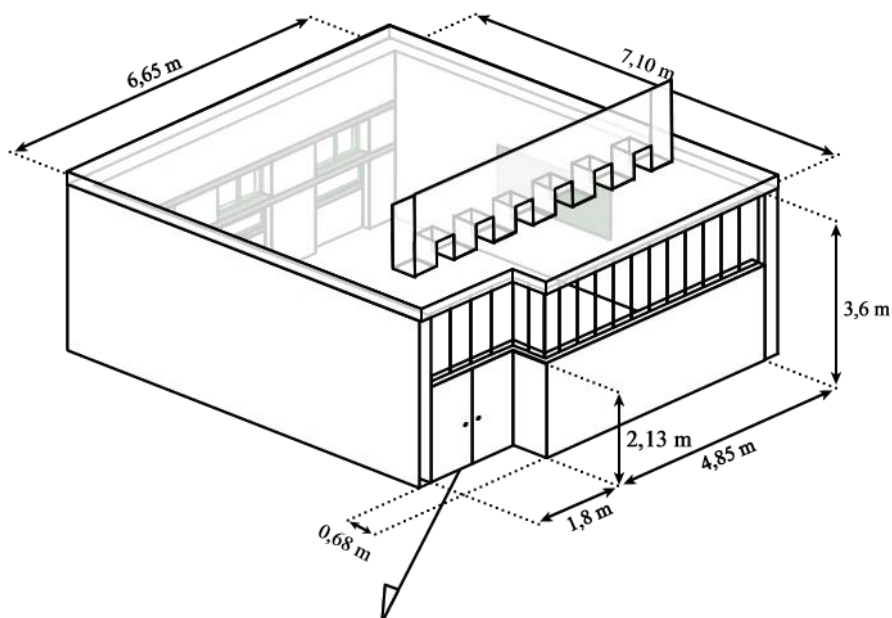
Volume: 180 m^3 ($6 \text{ m}^3/\text{ocupante}$)

Capacidade: 30 ocupantes

Aberturas: 3 janelas, 1 porta interior e 4 clarabóias

Direção: Sudeste ($\approx 131^\circ$)

Representação geométrica:



2.

Local: Escola Superior Agrária do IPB

Sala: G3-S5/01

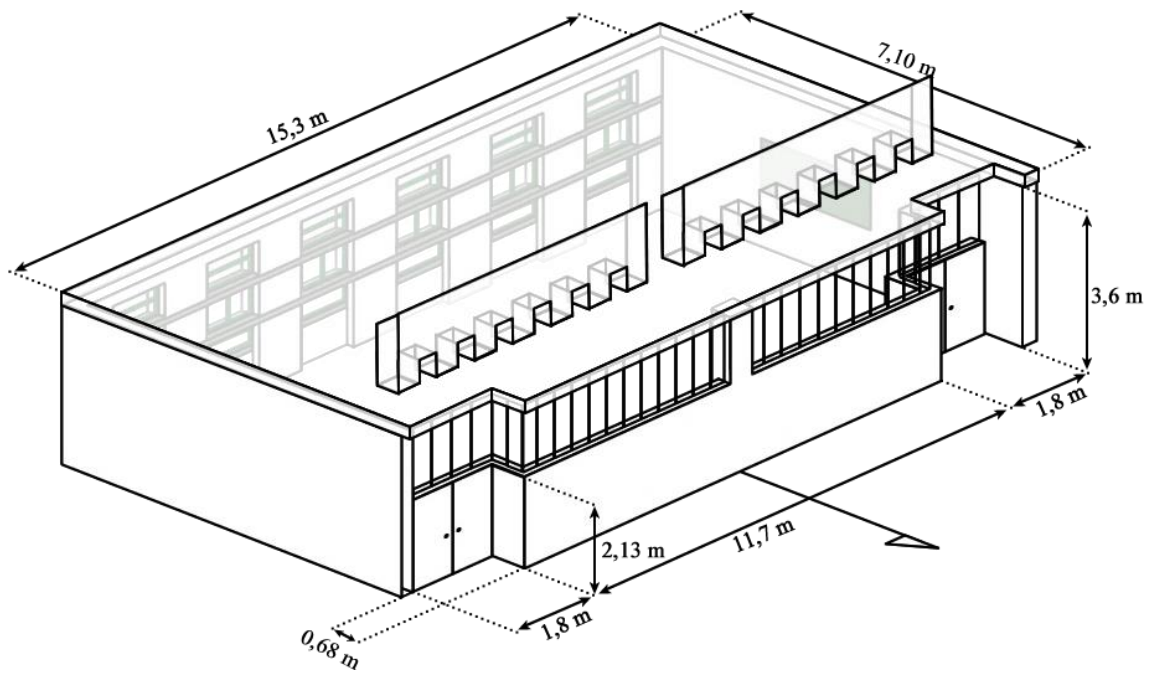
Volume: 380 m^3 ($5,4 \text{ m}^3/\text{ocupante}$)

Capacidade: 70 ocupantes

Aberturas: 6 janelas, 2 portas interiores e 8 clarabóias

Direção: Sul ($\approx 181^\circ$)

Representação geométrica:



3.

Local: Escola Superior de Tecnologia e Gestão do IPB

Sala: 115

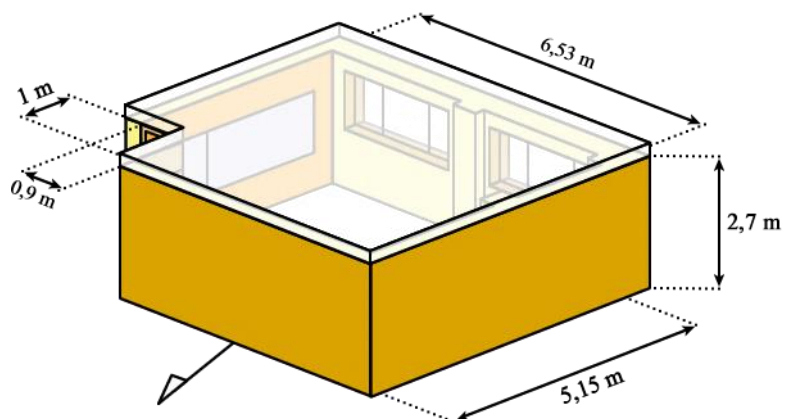
Volume: 90 m^3 ($3,6 \text{ m}^3/\text{ocupante}$)

Capacidade: 25 ocupantes

Aberturas: 4 janelas e 1 porta interior

Direção: Sudeste ($\approx 150^\circ$)

Representação geométrica:



4.

Local: Escola Superior de Tecnologia e Gestão do IPB

Sala: 117

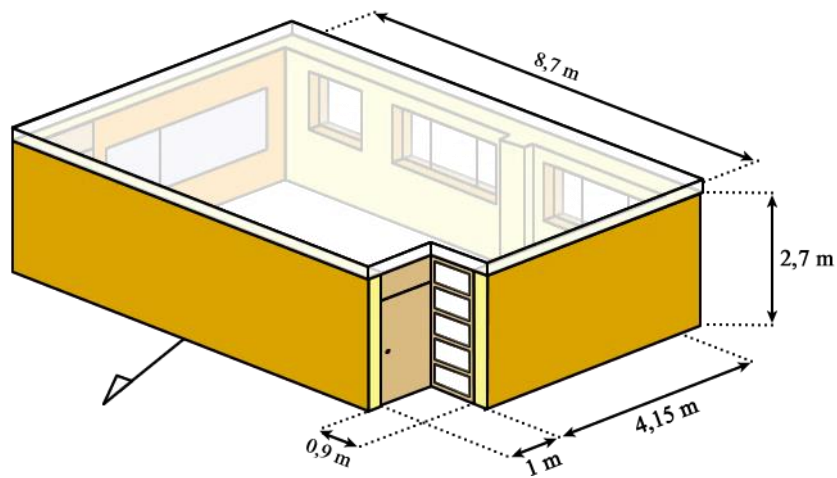
Volume: 120 m^3 ($3,1 \text{ m}^3/\text{ocupante}$)

Capacidade: 38 ocupantes

Aberturas: 5 janelas e 2 portas interiores

Direção: Sudeste ($\approx 150^\circ$)

Representação geométrica:



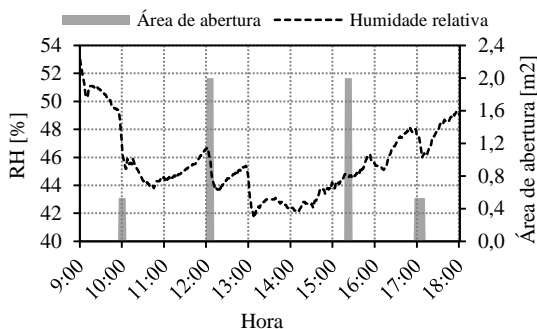
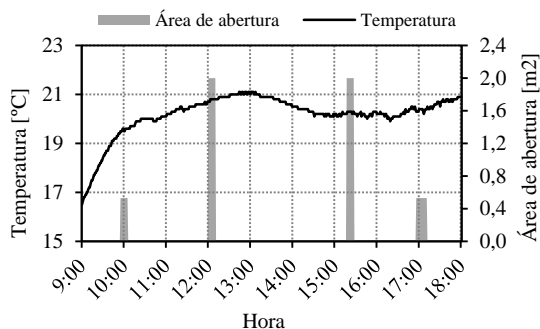
Anexo IV

Gráficos da evolução temporal da temperatura e humidade relativa interiores e área de abertura, em cada ensaio.

Sala G5-S3/01

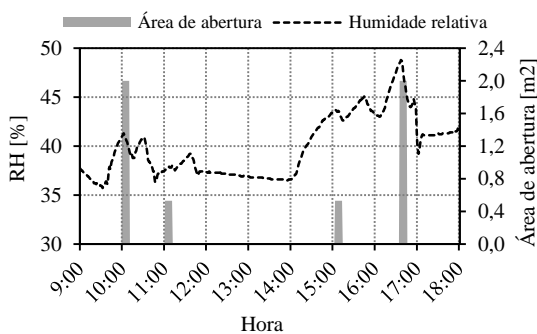
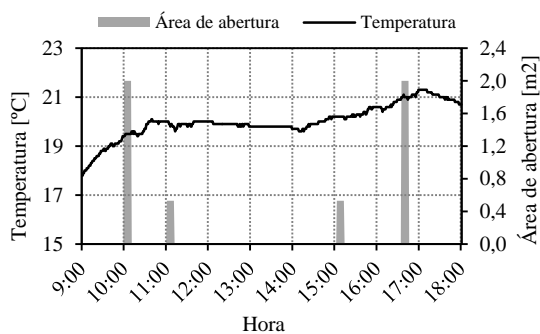
Ensaio 1

09 de Março 2013



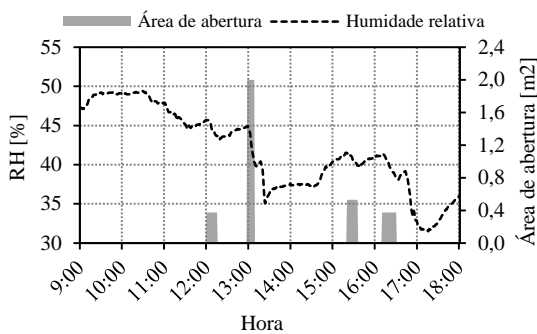
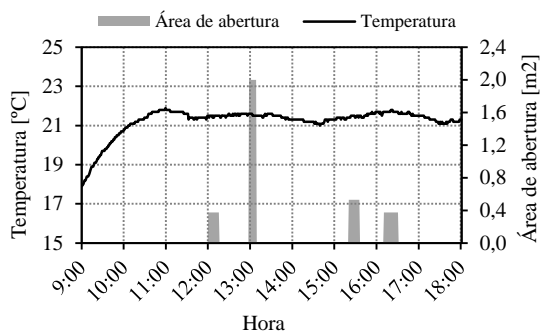
Ensaio 2

19 de Março 2013



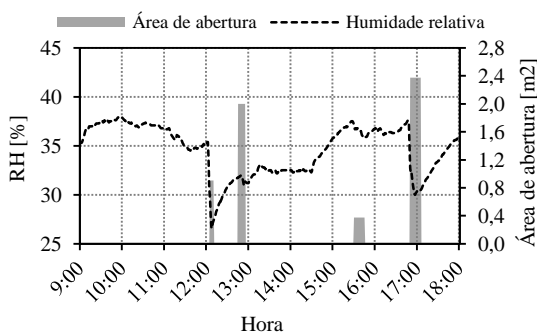
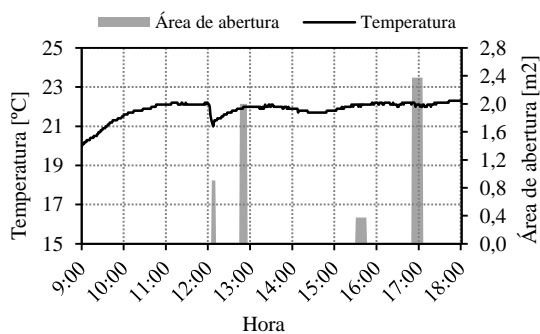
Ensaio 3

05 de Abril 2013



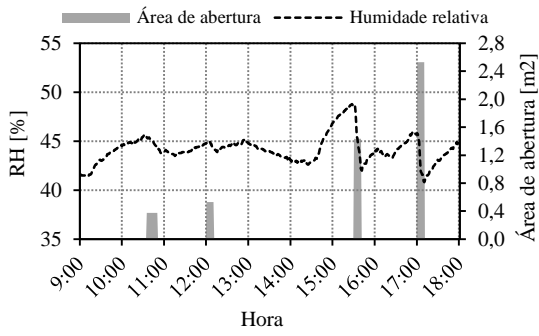
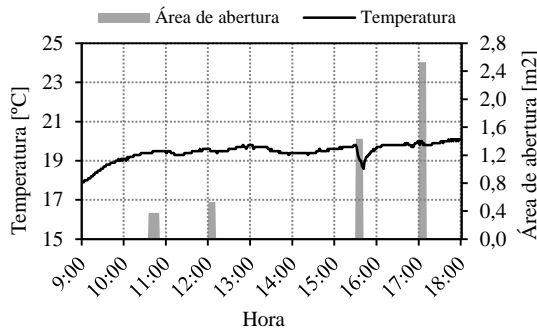
Ensaio 4

20 de Abril 2013



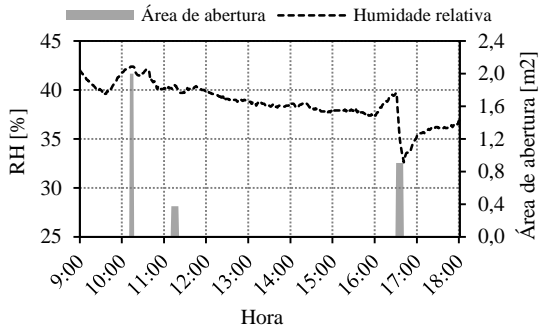
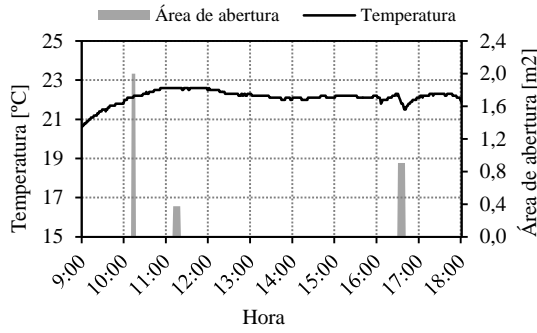
Ensaio 5

18 de Maio 2013



Ensaio 6

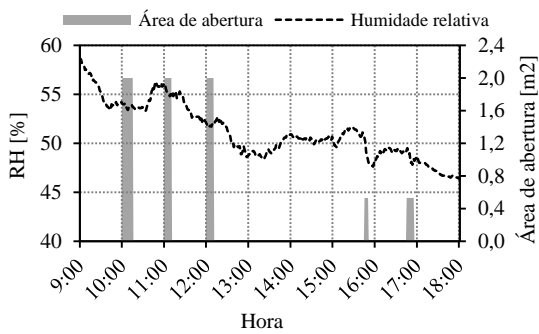
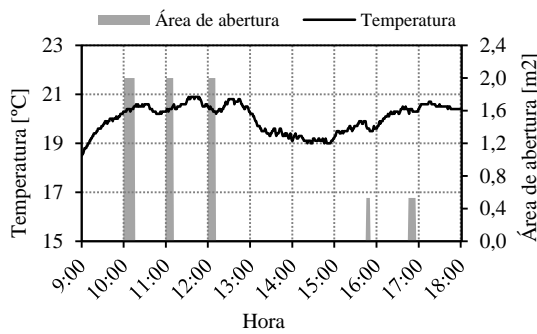
28 de Maio 2013



Sala G3-S5/01

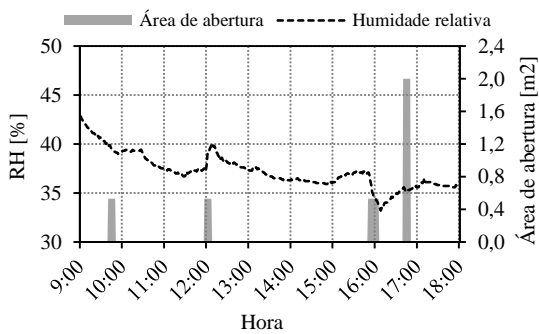
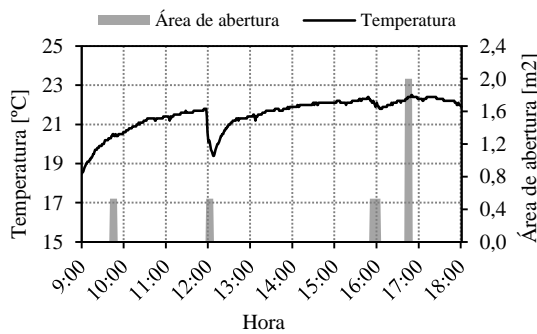
Ensaio 1

07 de Março 2013



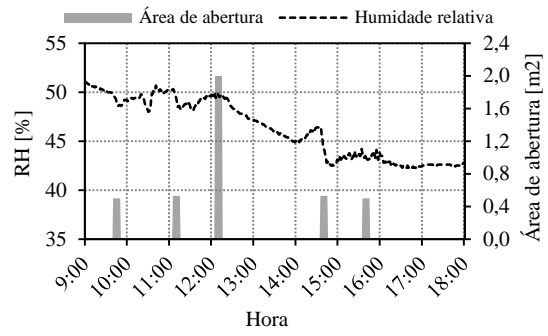
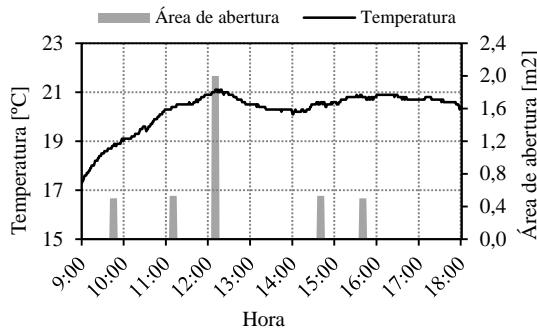
Ensaio 2

22 de Março 2013



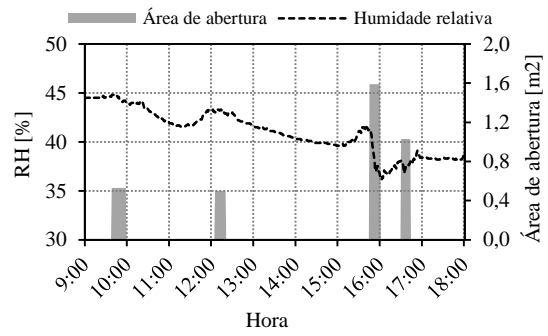
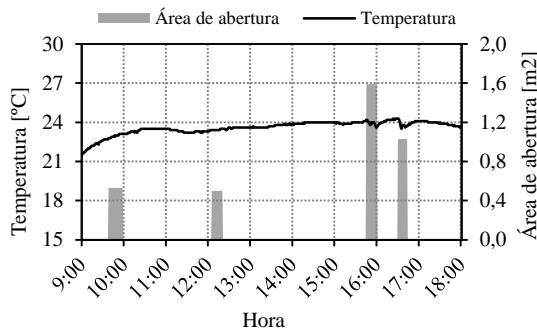
Ensaio 3

02 de Abril 2013



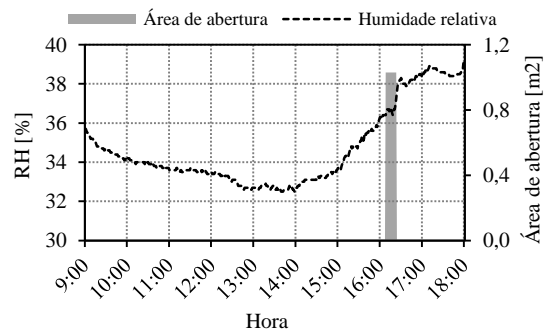
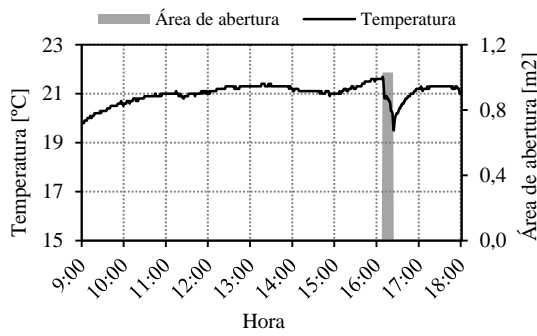
Ensaio 4

18 de Abril 2013



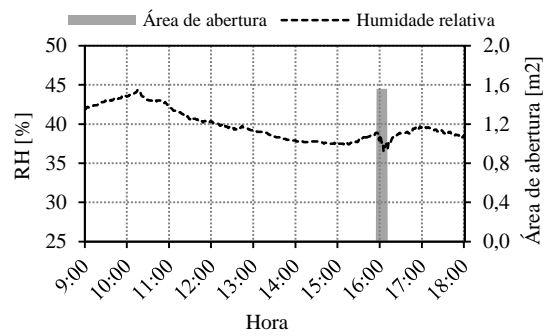
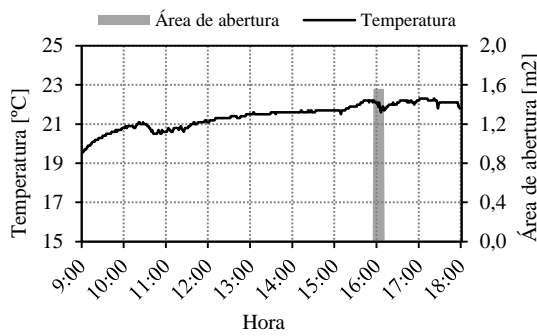
Ensaio 5

16 de Maio 2013



Ensaio 6

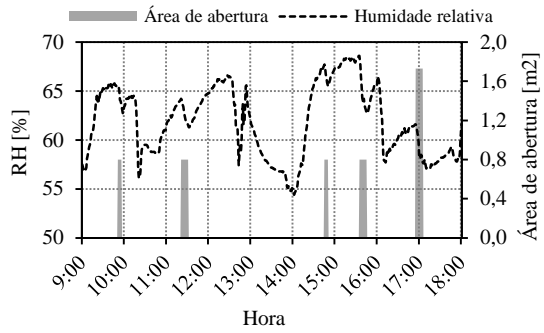
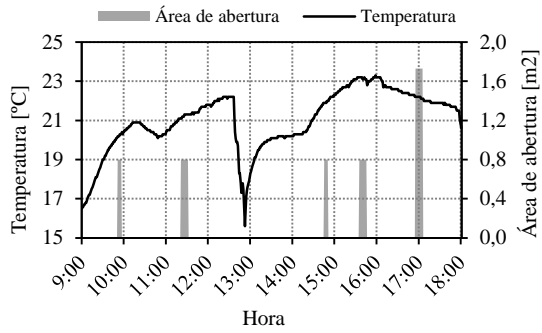
30 de Maio 2013



Sala 115

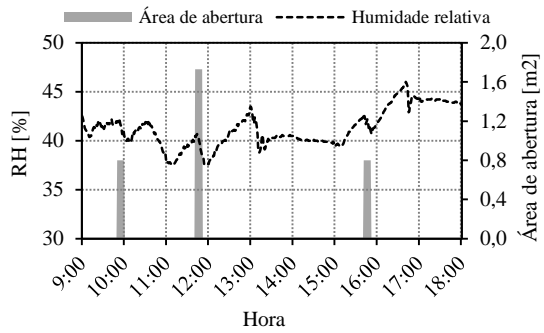
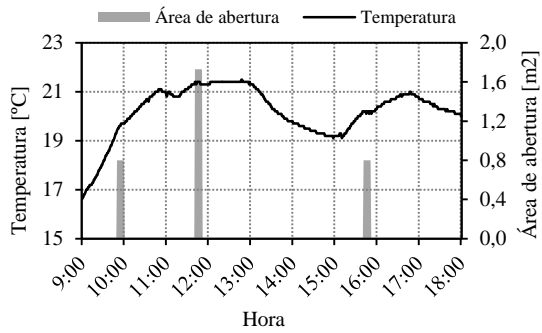
Ensaio 1

05 de Março 2013



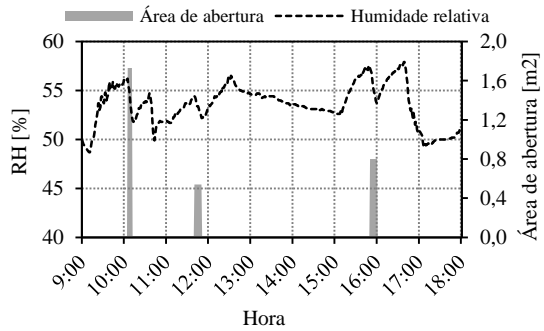
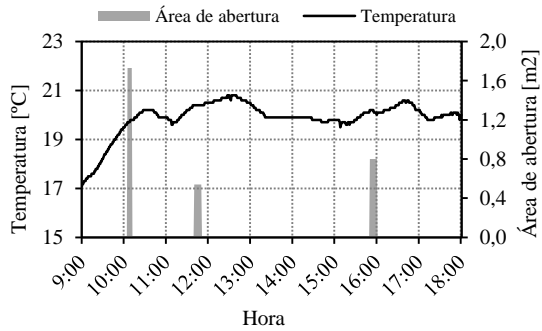
Ensaio 2

20 de Março 2013



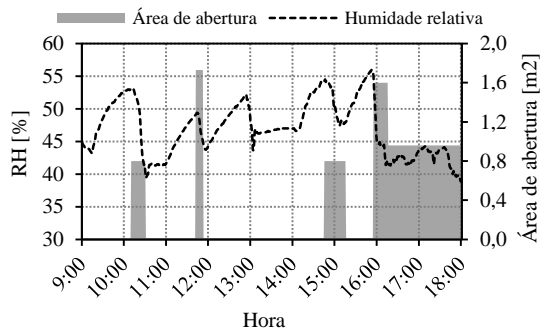
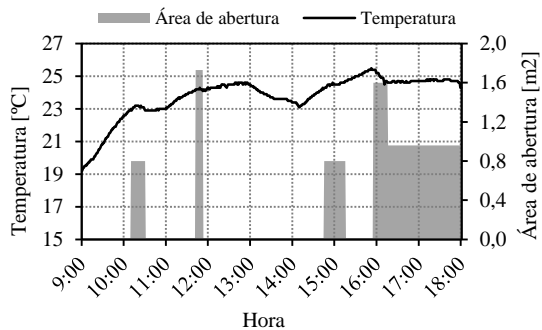
Ensaio 3

03 de Abril 2013



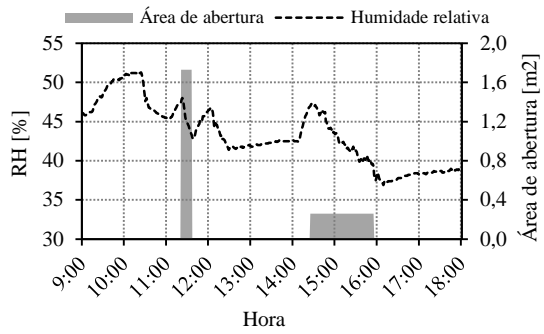
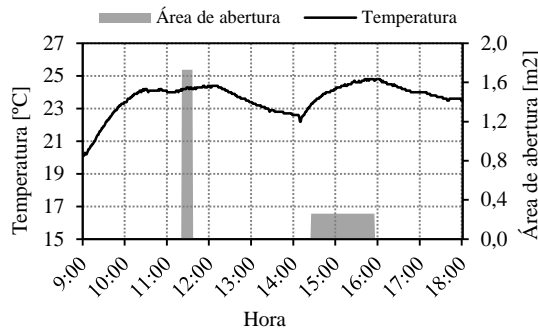
Ensaio 4

16 de Abril 2013



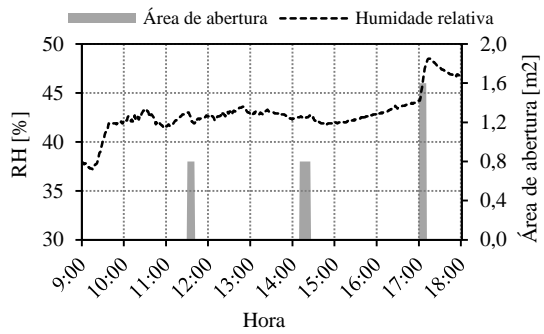
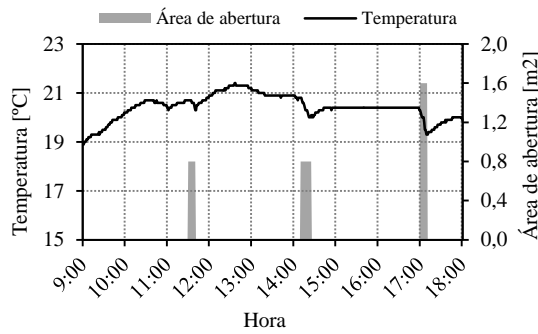
Ensaio 5

14 de Maio 2013



Ensaio 6

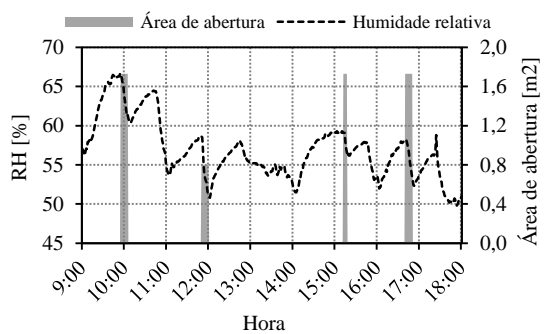
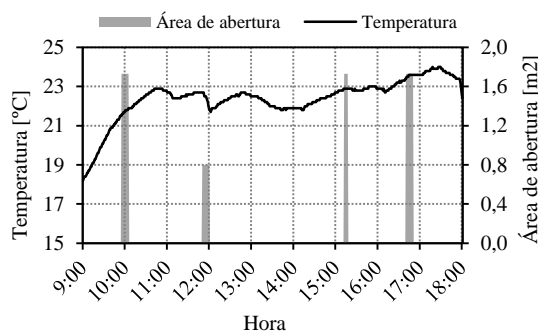
29 de Maio 2013



Sala 117

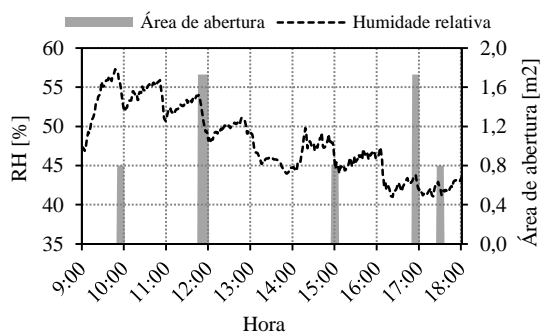
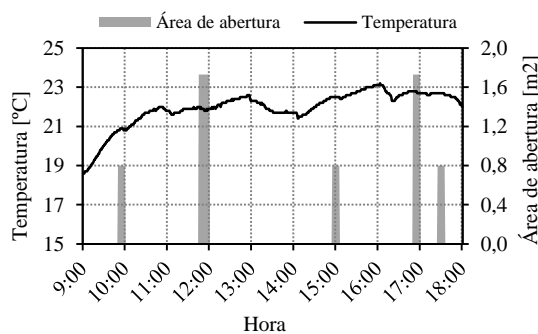
Ensaio 1

06 de Março 2013



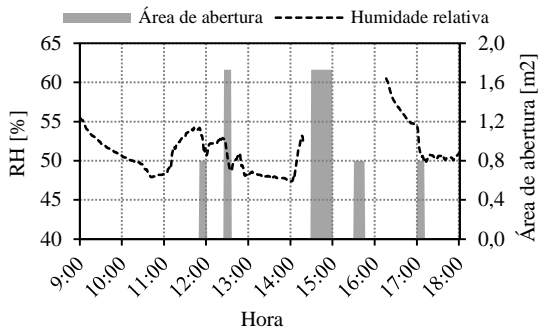
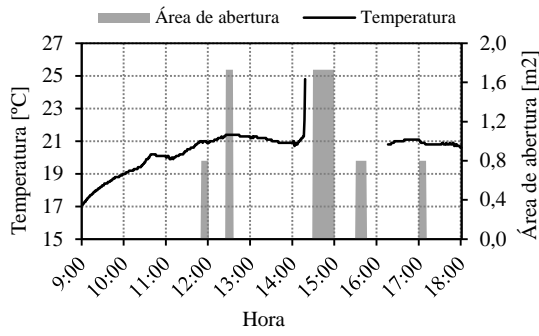
Ensaio 2

22 de Março 2013



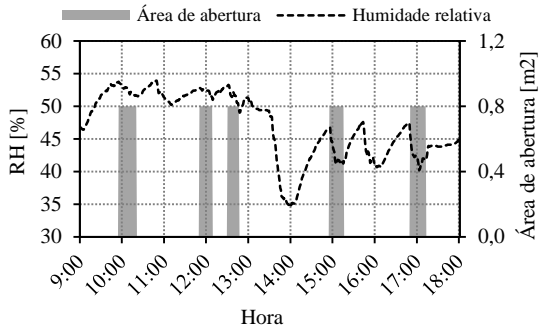
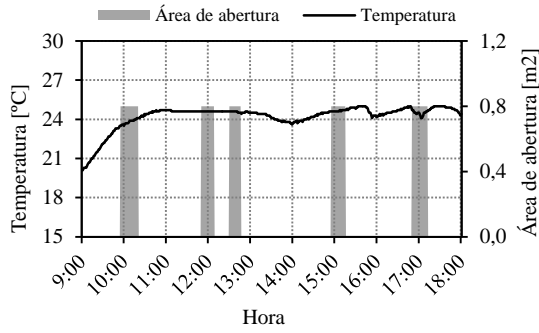
Ensaio 3

04 de Abril 2013



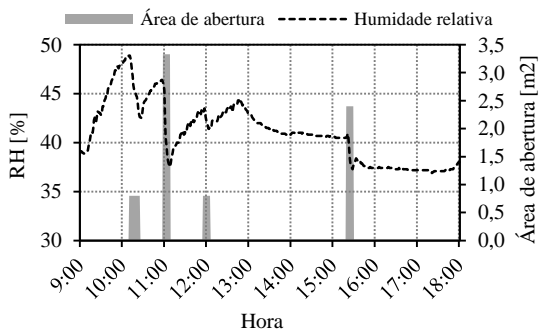
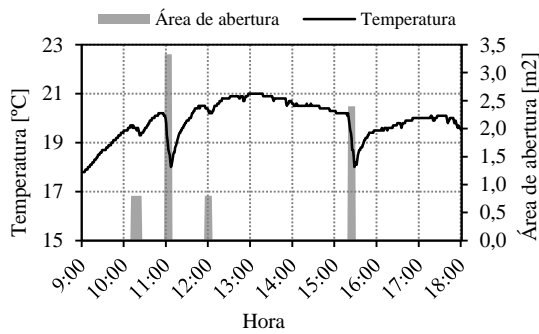
Ensaio 4

17 de Abril 2013



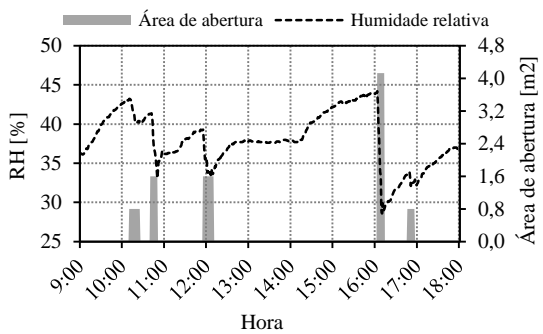
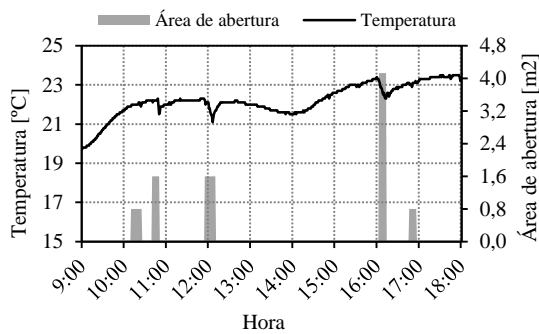
Ensaio 5

17 de Maio 2013



Ensaio 6

31 de Maio 2013



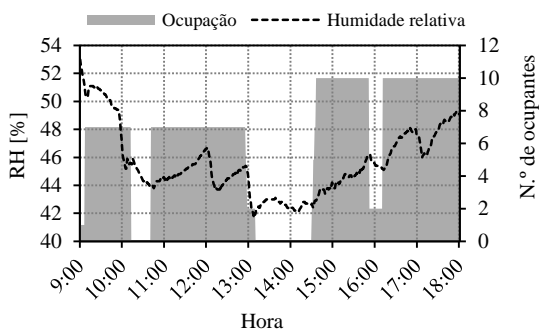
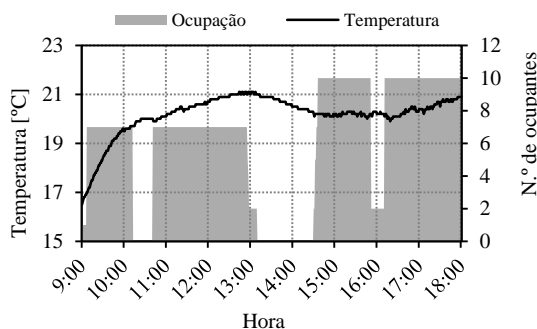
Anexo V

Gráficos da evolução temporal da temperatura e humidade relativa interiores e ocupação, em cada ensaio.

Sala G5-S3/01

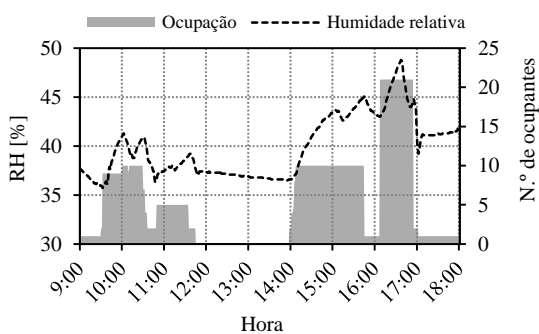
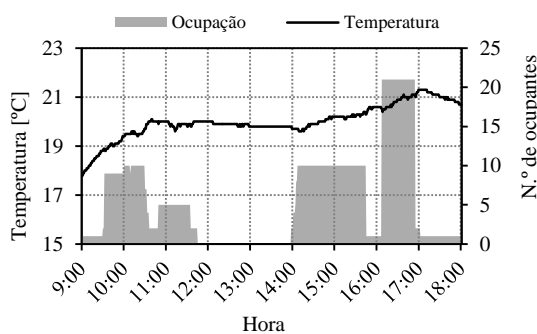
Ensaio 1

09 de Março 2013



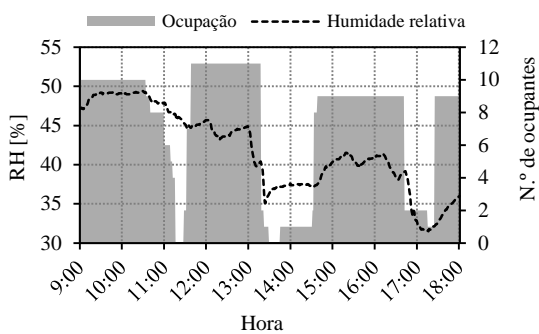
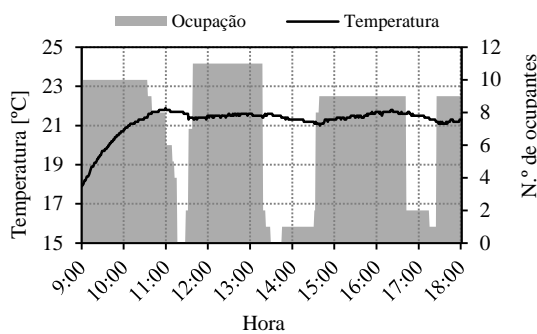
Ensaio 2

19 de Março 2013



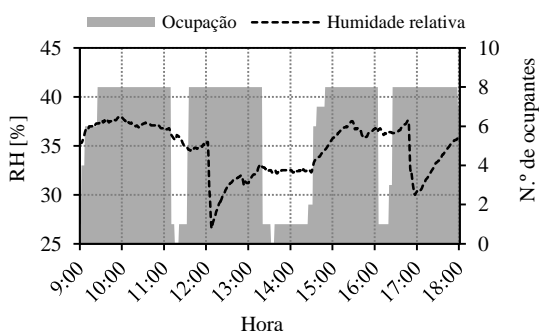
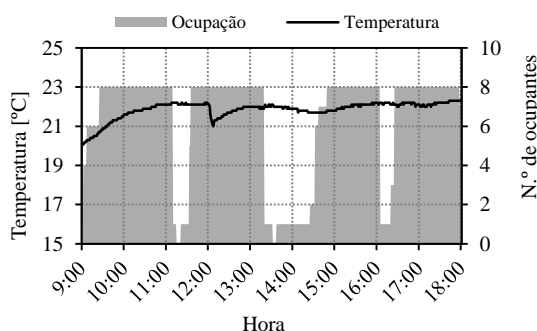
Ensaio 3

05 de Abril 2013



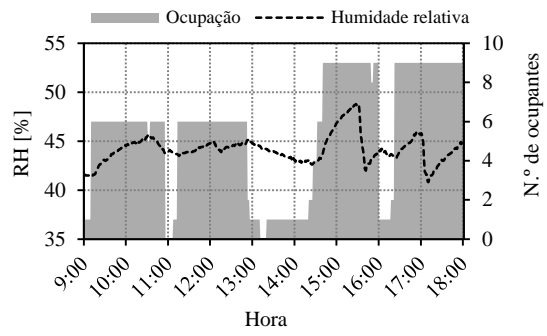
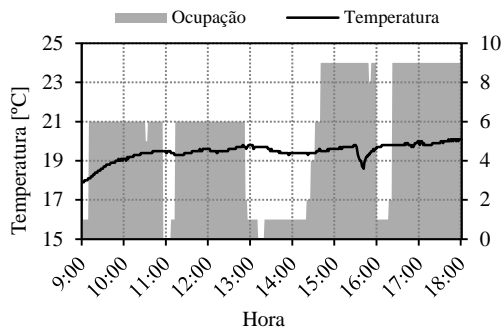
Ensaio 4

20 de Abril 2013



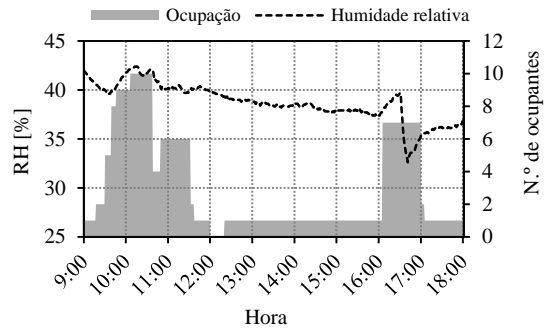
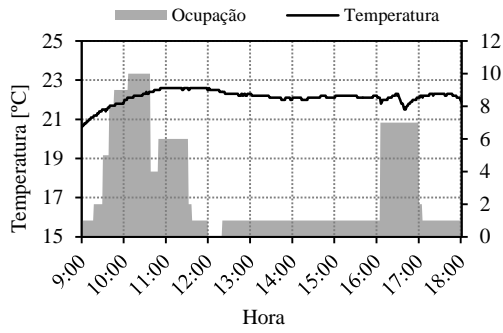
Ensaio 5

18 de Maio 2013



Ensaio 6

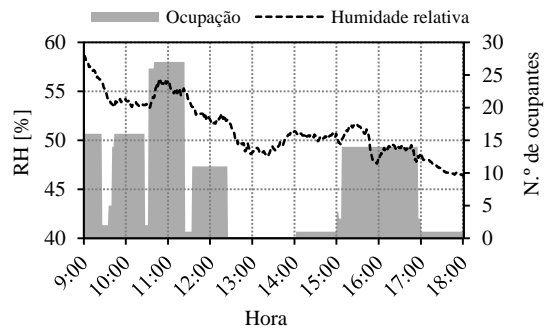
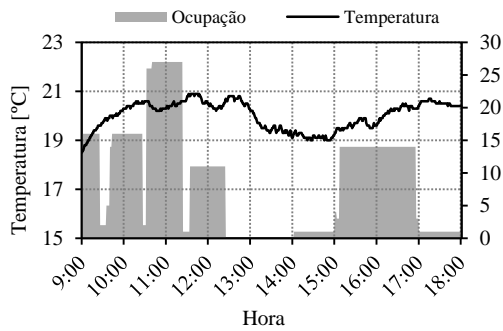
28 de Maio 2013



Sala G3-S5/01

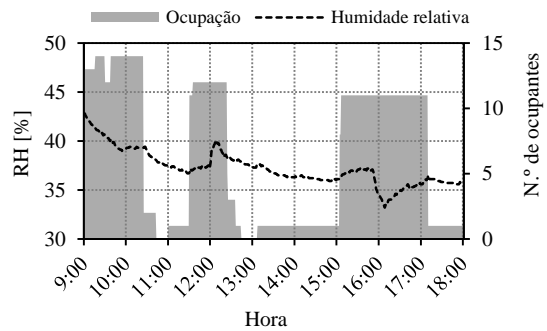
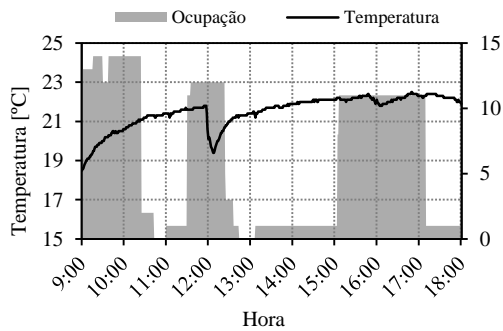
Ensaio 1

07 de Março 2013



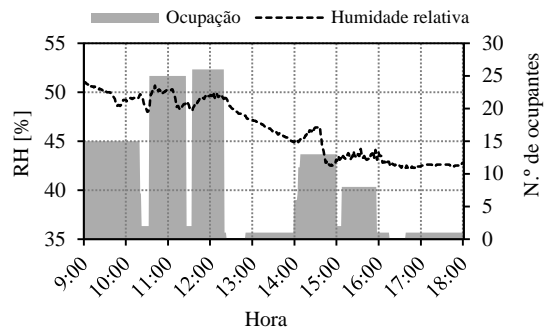
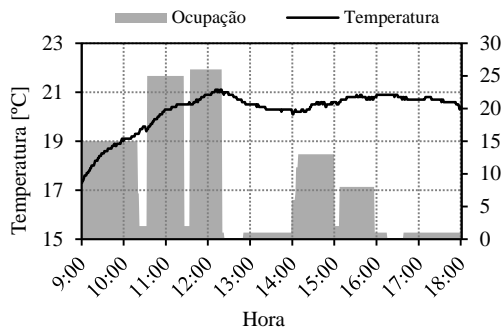
Ensaio 2

22 de Março 2013



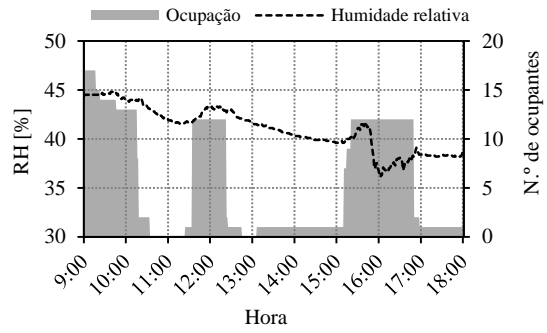
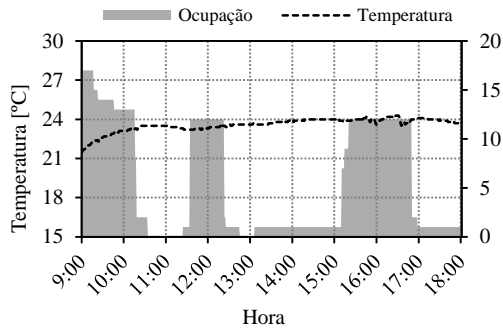
Ensaio 3

02 de Abril 2013



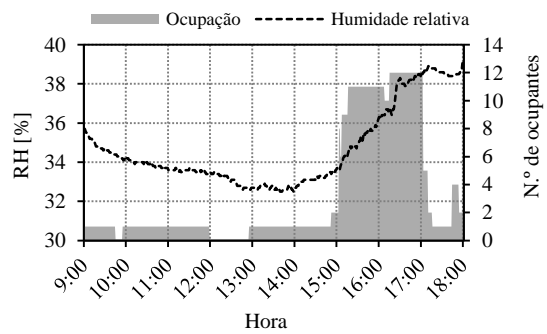
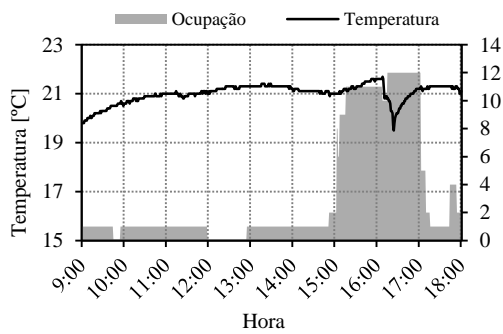
Ensaio 4

18 de Abril 2013



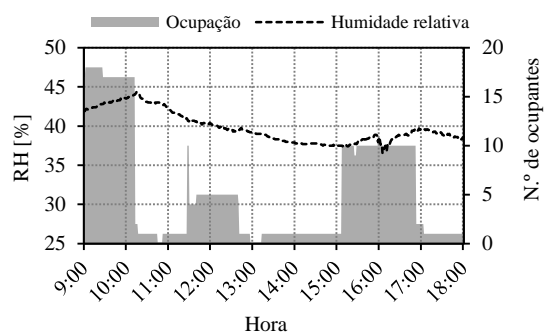
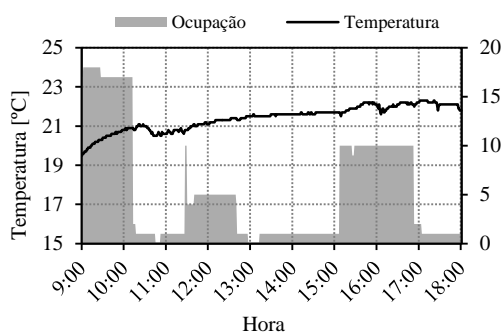
Ensaio 5

16 de Maio 2013



Ensaio 6

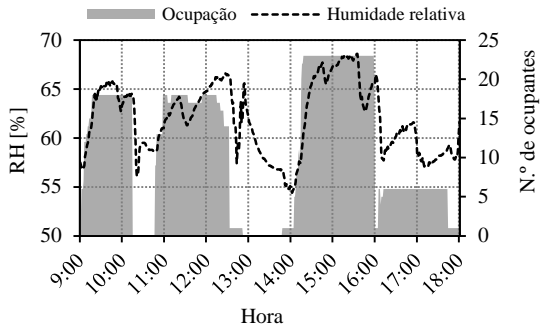
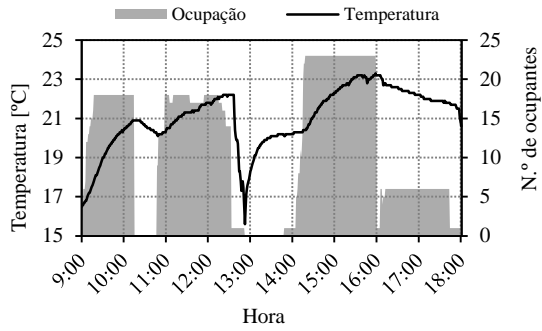
30 de Maio 2013



Sala 115

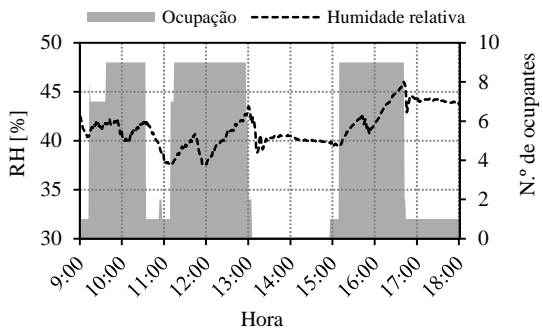
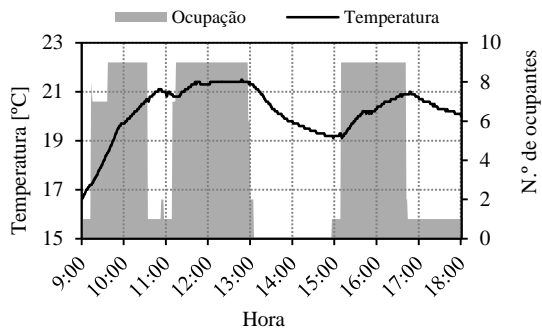
Ensaio 1

05 de Março 2013



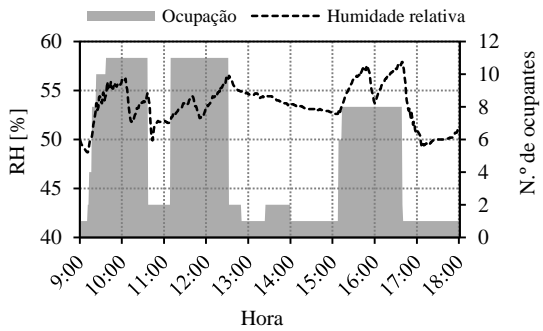
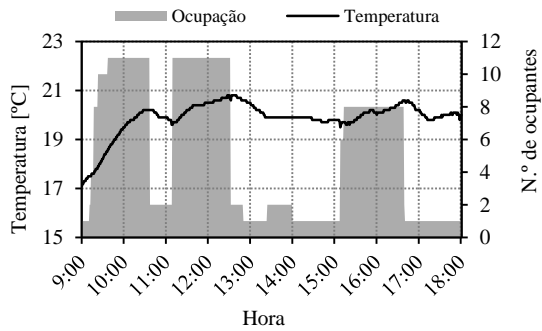
Ensaio 2

20 de Março 2013



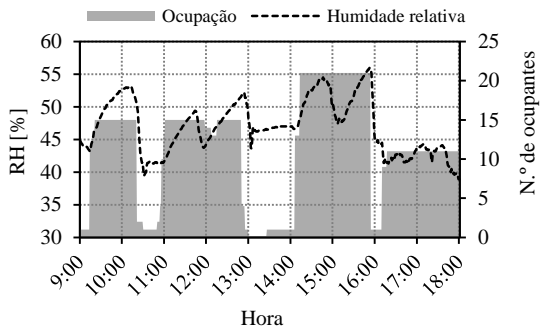
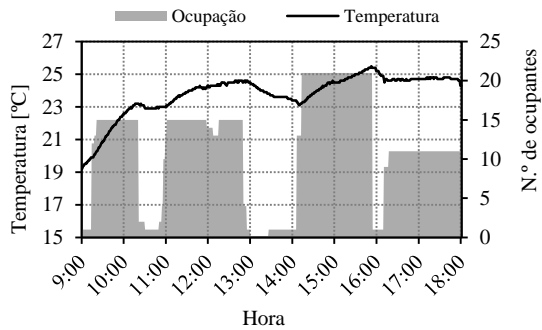
Ensaio 3

03 de Abril 2013



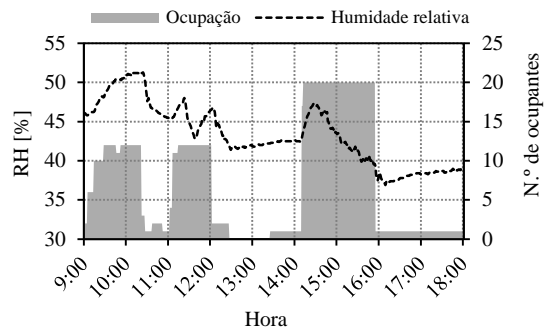
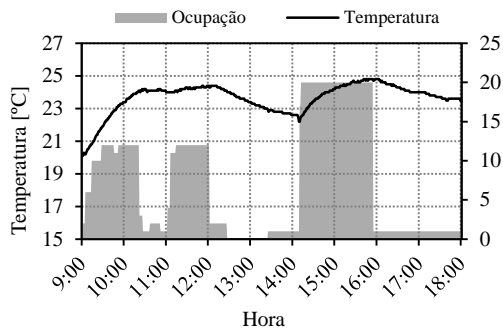
Ensaio 4

16 de Abril 2013



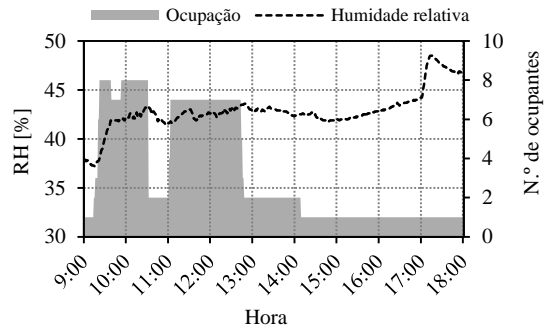
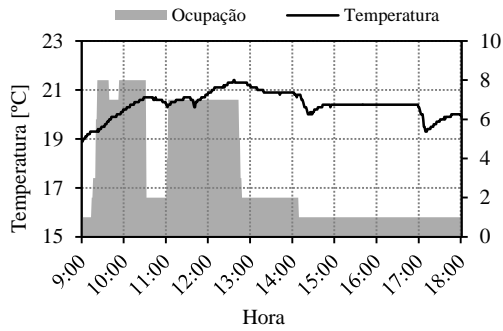
Ensaio 5

14 de Maio 2013



Ensaio 6

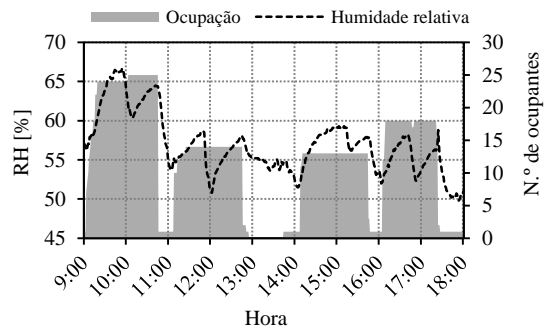
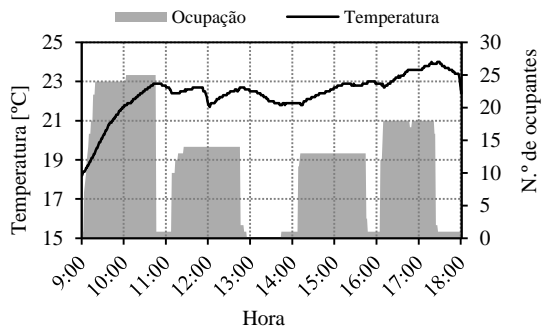
29 de Maio 2013



Sala 117

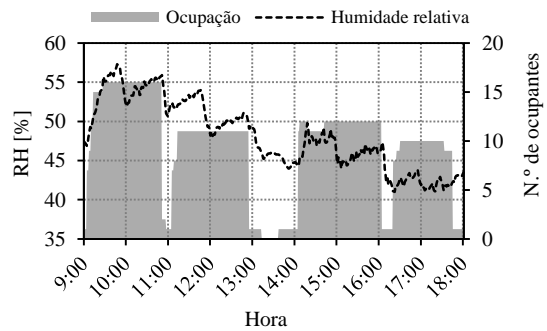
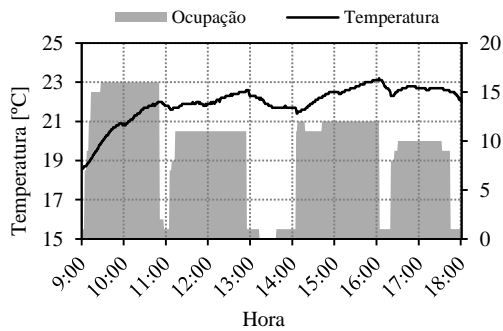
Ensaio 1

06 de Março 2013



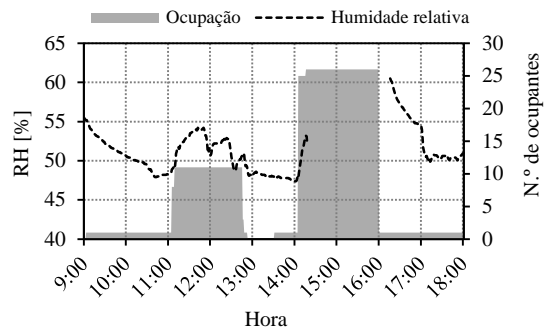
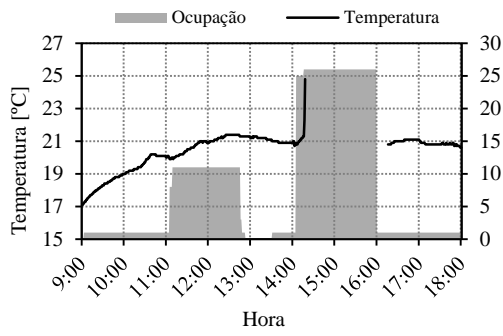
Ensaio 2

22 de Março 2013



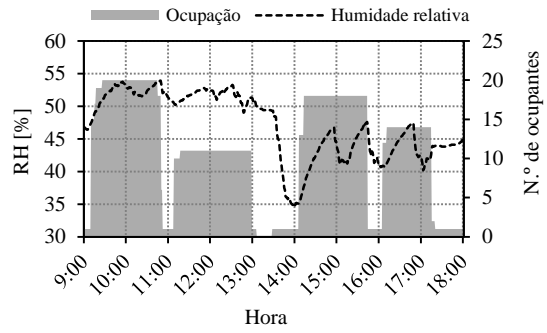
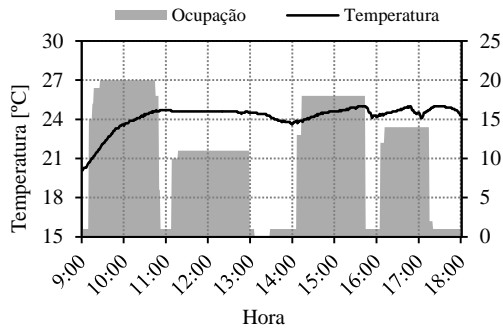
Ensaio 3

04 de Abril 2013



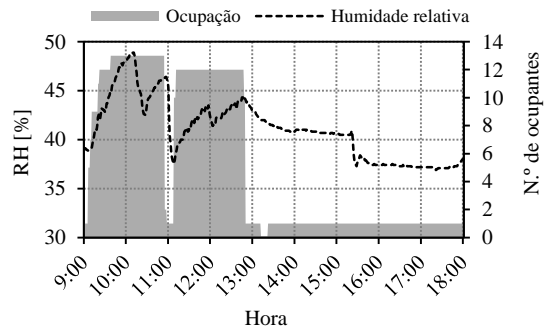
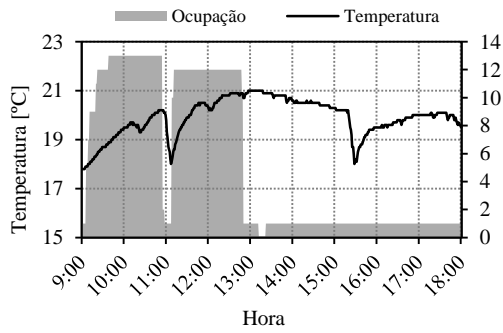
Ensaio 4

17 de Abril 2013



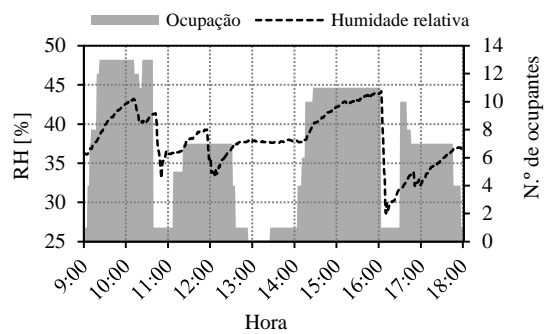
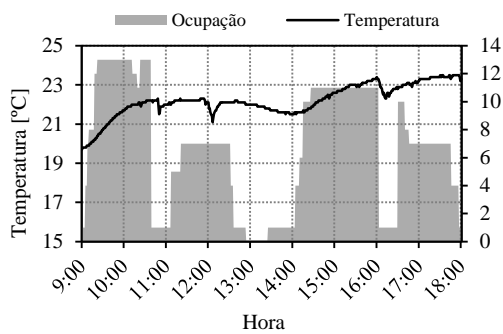
Ensaio 5

17 de Maio 2013



Ensaio 6

31 de Maio 2013

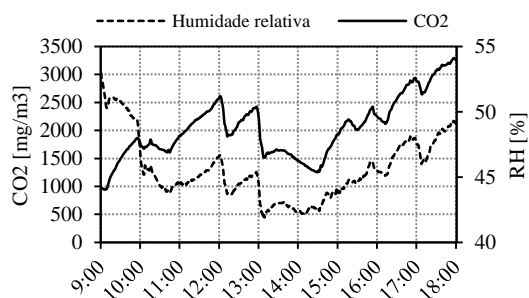


Anexo VI

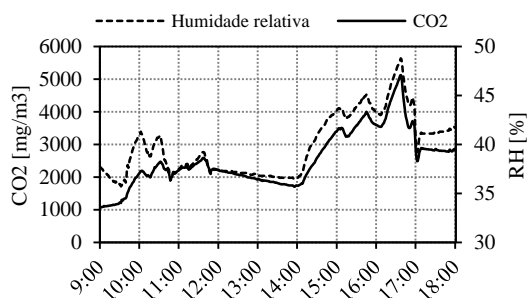
Gráficos da evolução temporal da concentração de CO₂ e da humidade relativa interiores, em cada ensaio.

Sala G5-S3/01

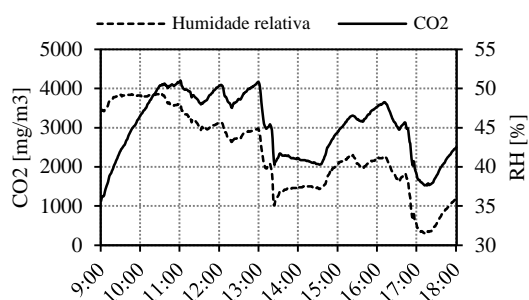
Ensaio 1: 09 de Março 2013



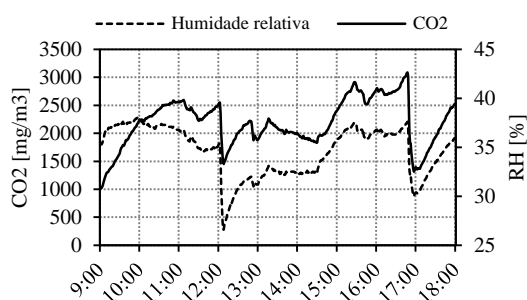
Ensaio 2: 19 de Março 2013



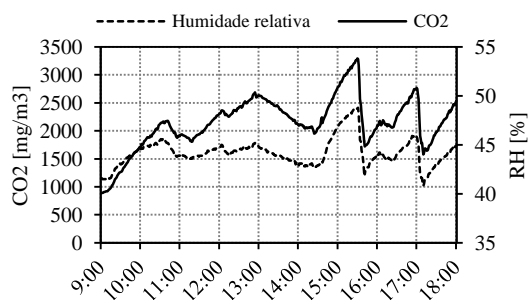
Ensaio 3: 05 de Abril 2013



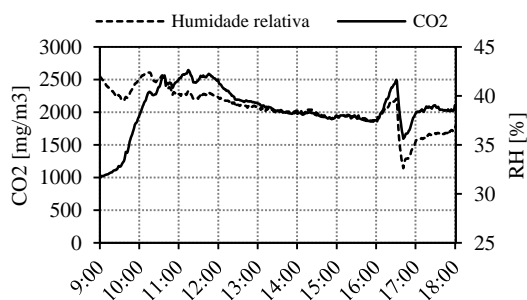
Ensaio 4: 20 de Abril 2013



Ensaio 5: 18 de Maio 2013

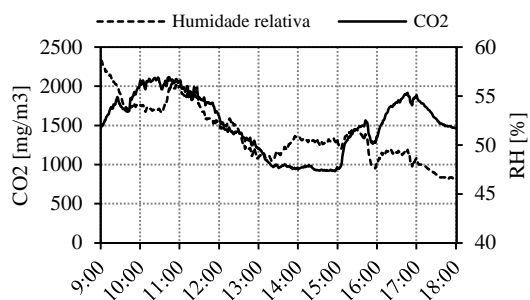


Ensaio 6: 28 de Maio 2013

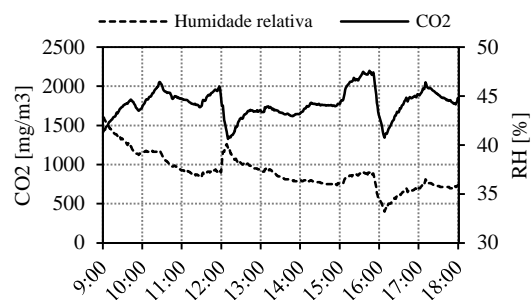


Sala G3-S5/01

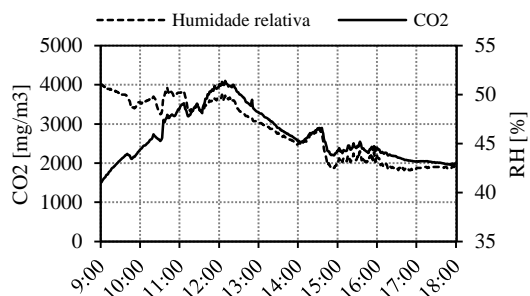
Ensaio 1: 07 de Março 2013



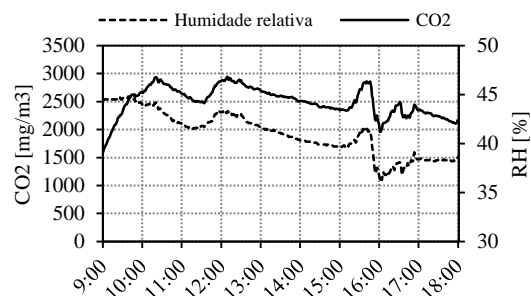
Ensaio 2: 22 de Março 2013



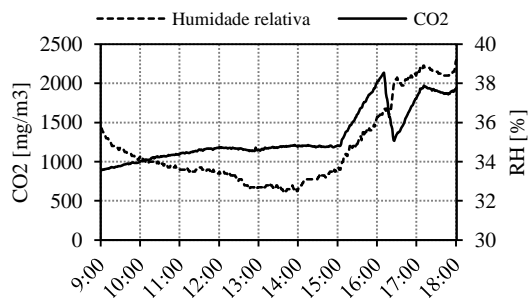
Ensaio 3: 02 de Abril 2013



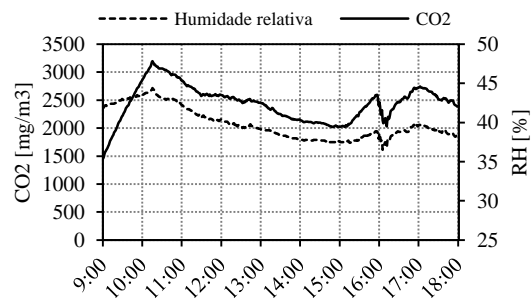
Ensaio 4: 18 de Abril 2013



Ensaio 5: 16 de Maio 2013

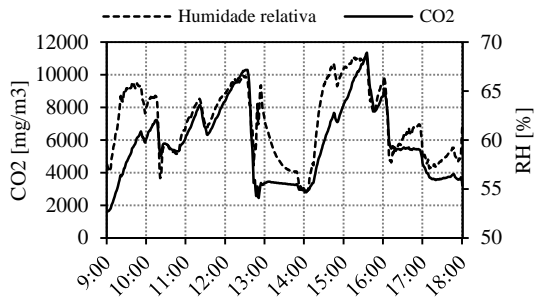


Ensaio 6: 30 de Maio 2013

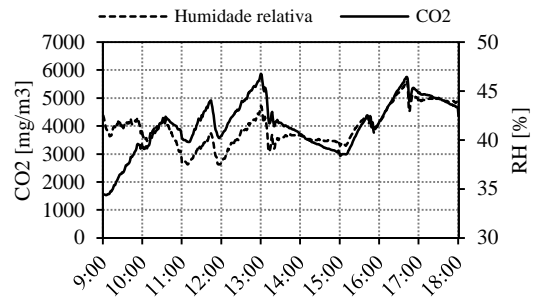


Sala 115

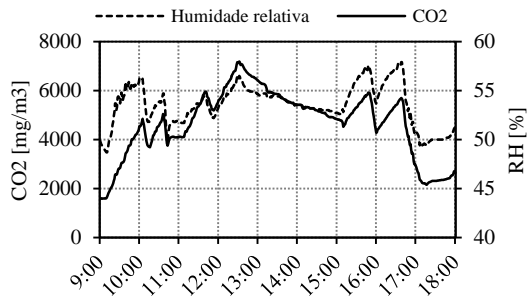
Ensaio 1: 05 de Março 2013



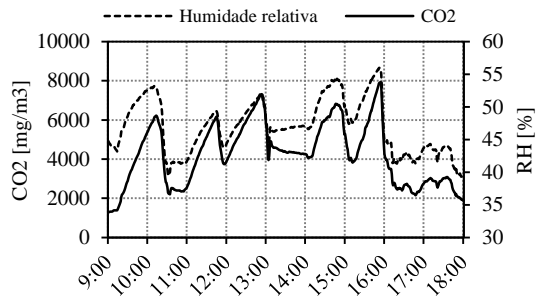
Ensaio 2: 20 de Março 2013



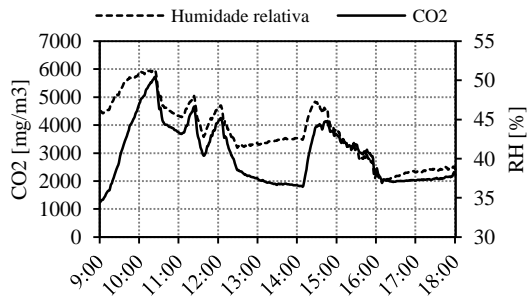
Ensaio 3: 03 de Abril 2013



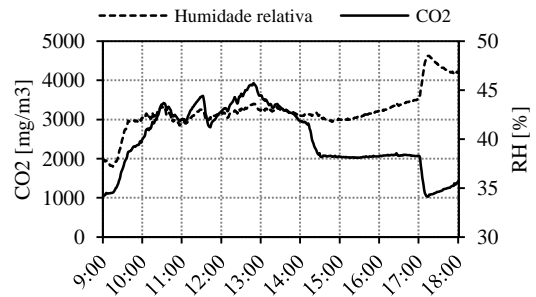
Ensaio 4: 16 de Abril 2013



Ensaio 5: 14 de Maio 2013

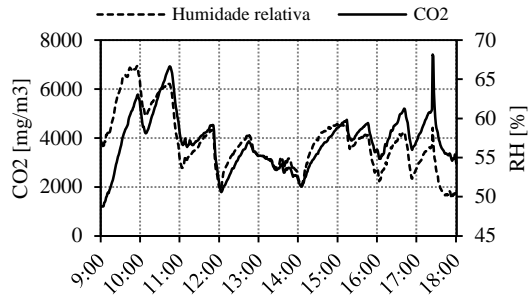


Ensaio 6: 29 de Maio 2013

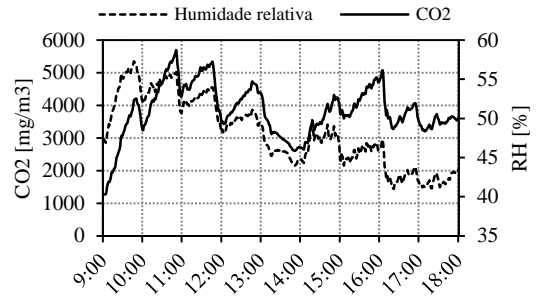


Sala 117

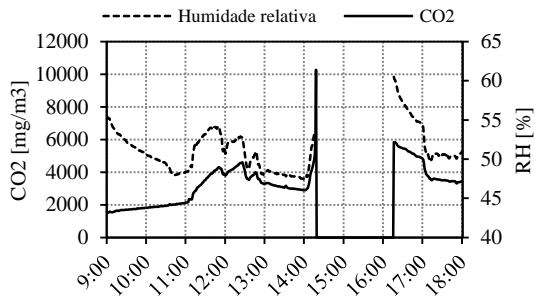
Ensaio 1: 06 de Março 2013



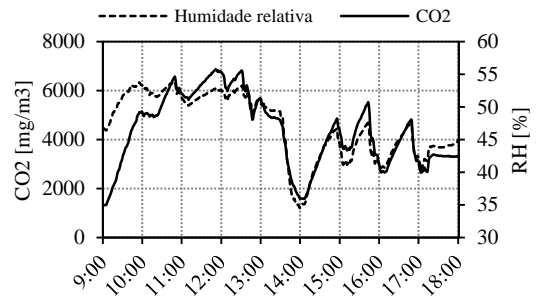
Ensaio 2: 22 de Março 2013



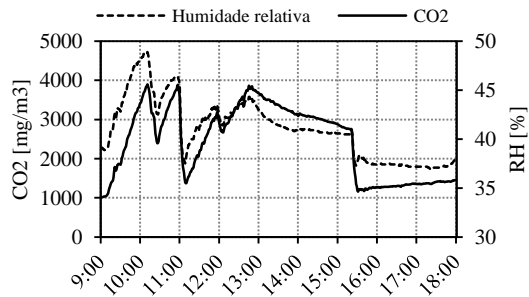
Ensaio 3: 04 de Abril 2013



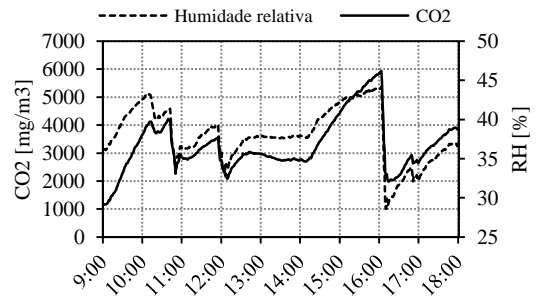
Ensaio 4: 17 de Abril 2013



Ensaio 5: 17 de Maio 2013



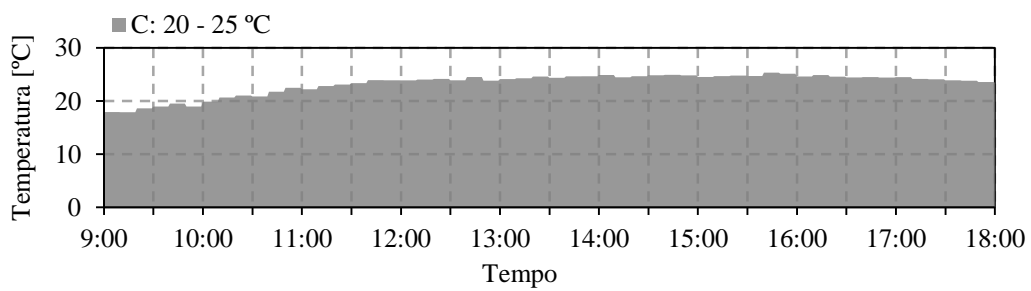
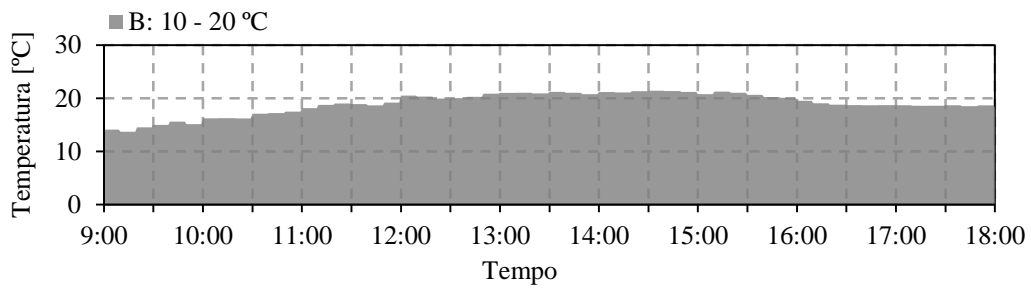
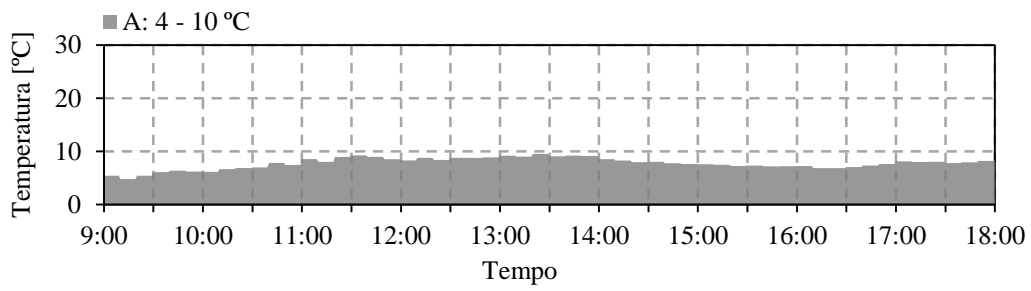
Ensaio 6: 31 de Maio 2013



Anexo VII

Perfis de temperatura exterior e de velocidade do vento utilizados no delineamento de cenários.

Perfis de temperatura exterior



Perfis de velocidade do vento

