



Universidade Nova de Lisboa
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS NÍVEIS DE
QUALIDADE DO AR INTERIOR EM QUARTOS DE DORMIR**
Um Caso de Estudo

João Pedro Calçada Maia dos Santos

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil – Reabilitação de Edifícios

Júri:

Presidente: Professor Doutor Fernando M.A. Henriques

Arguente: Doutor João Carlos Viegas

Orientador: Professor Doutor Daniel Aelenei

LISBOA

2008

Agradecimentos

Ao longo dos vários meses em que foi desenvolvido o trabalho que agora se concretiza na apresentação desta dissertação, foi muito importante poder contar com os conselhos e o apoio de familiares e amigos, aos quais gostaria de manifestar todo o meu apreço.

Agradeço, em particular, ao meu irmão Miguel e aos meus amigos João e Luís Vargas por toda a colaboração prestada durante o período de medições e pelo bom humor com que encararam a invasão da sua privacidade, em prol da ciência.

Um agradecimento especial ao Professor Daniel Aelenei, orientador da dissertação, pela competência e empenho com que acompanhou o trabalho, pelo incentivo e confiança manifestados desde a primeira hora e ainda pela liberdade de decisão que me concedeu e que foi determinante para o meu desenvolvimento pessoal.

Resumo

O aumento dos níveis de vida em Portugal tem sido acompanhado por uma maior exigência de conforto habitacional. Por outro lado, a implementação de medidas de conservação de energia e o desenvolvimento de novas técnicas construtivas, de que é exemplo o uso de caixilharias de alto desempenho, conduziram a habitações com menor permeabilidade ao ar. Este facto pode levar a uma redução significativa da qualidade do ar interior, com consequências para a saúde dos ocupantes e/ou degradação dos elementos construtivos (condensações). Para evitar a ocorrência de tais situações, os níveis de ventilação das habitações devem ser tais que a concentração dos diversos poluentes existentes no local seja inferior aos mínimos regulamentares, o que nem sempre se verifica.

Este estudo teve como objectivo a determinação da taxa de renovação horária em quartos de dormir de duas habitações em edifícios multifamiliares de construção recente, situadas no concelho de Lisboa. A taxa de renovação horária foi determinada pelo método do gás traçador, utilizando o dióxido de carbono produzido no metabolismo dos ocupantes. A monitorização contínua da concentração interior de dióxido de carbono decorreu durante 45 dias, em Fevereiro e Março de 2008, recorrendo a detectores por absorção não-dispersiva de infravermelhos. Como base nos resultados obtidos, foram ainda avaliados os níveis de qualidade do ar interior dos compartimentos em análise.

Abstract

The improvement of living standards in Portugal appears side by side with the higher requirements for indoor comfort. At the same time, the promoted measures for building energy conservation and the development of new construction techniques, such as it is the case of well insulated windows, have led to high air-tight buildings, a fact that may potentially decrease the indoor air quality, in addition of potentially causing the appearance of building anomalies, such as mould. In order to avoid such negative effects, the ventilation levels should always ensure that the concentration of pollutants present in the room is below the minimum values recommended by the ventilation standards, a condition which is not always fulfilled.

The aim of this work is to determine the effective air change rates (ACR) of bedrooms in two different apartments recently constructed in Lisbon.

The air change rate is measured by the tracer gas method based on the occupant-generated carbon dioxide. In order to obtain the key values, the indoor CO₂ concentration was continuously monitored during a period of 45 days (February and March 2008).

The experimental measurements were performed using a non-dispersive infra-red detector.

Siglas

QAI – Qualidade do Ar Interior

NDIR – Non-Dispersive Infrared

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

SB – Sick Building

SBS – Sick Building Syndrome

ACR – Air Change Rate

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios

COV – Composto Orgânico Volátil

COVT – Compostos Orgânicos Voláteis Totais

SPAIC – Sociedade Portuguesa de Alergologia e Imunologia Clínica

TLV – Threshold Limit Values

STEL – Short-Term Exposure Limit

TWA – Time Weighted Average Concentration

PFT – Perfluorcarbon tracer

MDF – Medium-density fiberboard

Simbologia

R_{ph} : taxa de renovação horária

δp_e : coeficiente de pressão exterior

p_∞ : pressão atmosférica

ρ : massa volúmica do ar

v_∞ : velocidade do vento à altura do beiral

ρ_o : densidade do ar a 273K

T_{ext} : temperatura do ar exterior

T_{int} : temperatura do ar interior

Q : caudal volúmico de ventilação

V : volume efectivo do espaço

t : tempo

$c(t)$: concentração volúmica da espécie química no espaço confinado

c_{ext} : concentração volúmica da espécie química no exterior

E : caudal volúmico de remoção da espécie química (por meios que não a ventilação)

q : caudal volúmico de emissão da espécie química

c_{int} : concentração volúmica da espécie química no interior do compartimento

PD : percentagem previsível de ocupantes insatisfeitos com a qualidade do ar percebida

τ_n : constante de tempo nominal

q_{CO_2} : caudal volúmico de emissão de CO_2

q_{O_2} : caudal volúmico de consumo de O_2

A_D : área do corpo segundo DuBois

RQ : quociente respiratório

M : intensidade de actividade metabólica

H : altura da pessoa

W : massa corporal

cCO_2 : concentração de dióxido de carbono no interior do compartimento

Hr_{int} : humidade relativa interior

Hr_{ext} : humidade relativa exterior

Índice	pág.
Capítulo 1 – Introdução	13
1.1 Enquadramento do tema	13
1.2 Objectivos e metodologia	15
Capítulo 2 – Ventilação dos edifícios	16
2.1 Introdução	16
2.2 Contextualização Histórica	16
2.3 Conceitos gerais sobre ventilação	20
2.3.1 Ventilação natural	21
2.3.2 Ventilação natural/mista conjunta em edifícios de habitação	28
2.4 Legislação Portuguesa sobre ventilação natural	29
Capítulo 3 – Ventilação e Qualidade do Ar Interior	31
3.1 Introdução	31
3.2 Substâncias poluentes do ar interior/efeitos na saúde e conforto dos ocupantes	32
3.2.1 Poluentes de ocorrência inevitável no ar interior dos edifícios	33
3.2.2 Poluentes de ocorrência evitável ou minimizável no ar interior dos edifícios	34
3.2.3 Asma e doenças alérgicas	37
3.3 Avaliação da qualidade do ar interior	38
3.3.1 A qualidade do ar interior e a saúde dos ocupantes	38
3.3.2 A qualidade do ar interior e o conforto dos ocupantes	41
3.3.3 A qualidade do ar interior e a concentração de CO ₂	45
Capítulo 4 – Método do gás traçador. Técnicas de medição	48
4.1 Introdução	48
4.2 Fundamentos teóricos do método do gás traçador	48
4.3 Características de um gás traçador	50
4.3.1 O dióxido de carbono como gás traçador	50

4.4	Técnicas de medição usadas no método do gás traçador	52
4.4.1	Técnica do decaimento	52
4.4.2	Técnica da emissão constante	55
4.4.3	Técnica do estado estacionário	56
4.4.4	Técnica da emissão constante com recolha passiva – PFT	59
4.4.5	Limitações das técnicas de medição	61
4.5	A determinação da taxa de produção metabólica do dióxido de carbono	62
4.5.1	Introdução	62
4.5.2	Taxa de produção do dióxido de carbono no processo respiratório	62
4.6	O princípio de detecção do gás traçador	64
4.6.1	Introdução	64
4.6.2	Método de detecção por espectroscopia não-dispersiva de infravermelho, NDIR	65
Capítulo 5 – Metodologia		67
5.1	Introdução	67
5.2	Caracterização dos apartamentos/quartos de dormir seleccionados	68
5.3	Descrição do método de medições	71
5.4	Resultados das medições	73
Capítulo 6 – Avaliação dos níveis de qualidade do ar interior		84
6.1	Introdução	84
6.2	Relação entre a concentração de CO ₂ e a ocupação do compartimento	85
6.3	Determinação da taxa de renovação horária efectiva pela técnica do decaimento	86
6.3.1	Determinação da taxa de renovação horária efectiva no quarto T	87
6.3.2	Determinação da taxa de renovação horária efectiva no quarto B	92
6.4	Determinação da taxa de renovação horária efectiva pela técnica do estado estacionário	97
6.4.1	Determinação da taxa de renovação horária efectiva no quarto T	98
6.4.2	Determinação da taxa de renovação horária efectiva no quarto B	104
6.5	Comparação entre curvas experimentais e curvas calculadas pela técnica da emissão constante no quarto T	110

6.6 Estimativa da taxa de renovação horária do quarto B utilizando curvas calculadas pela técnica da emissão constante.	113
6.7 Conclusões sobre a determinação da taxa de renovação horária efectiva	115
6.8 Relação entre a concentração interior de CO ₂ e os níveis de qualidade do ar interior	115
Capítulo 7 – Conclusões	119

Índice de figuras

pág.

Figura 2.1 - Ventilação natural por torres eólicas no Médio Oriente (“badghir”)	17
Figura 2.2 - Evolução dos valores mínimos das taxas de ventilação nos EUA	19
Figura 2.3 - Distribuição de pressões nas fachadas de um edifício de planta rectangular (vista em corte vertical e vista em planta)	23
Figura 2.4 - Interferência no escoamento de dois edifícios lado a lado e distribuição de pressões em torno de um deles	24
Figura 2.5 - Distribuição de pressões nas fachadas de um edifício de planta em L (vista em planta)	25
Figura 2.6 - Pressão induzida por acção térmica entre duas aberturas situadas no mesmo plano vertical	26
Figura 2.7 - Fluxos de ar devidos à acção térmica	26
Figura 3.1 - Representação esquemática dos fluxos de uma espécie química num espaço confinado bem homogeneizado	39
Figura 3.2 - Relação entre a percentagem de pessoas insatisfeitas com a qualidade do ar percebida e o caudal de ventilação	43
Figura 3.3 - O CO ₂ como indicador da qualidade do ar	46
Figura 4.1 - Exemplo ilustrativo de função logarítmica aplicada ao decaimento	54
Figura 4.2 - Variação da concentração de CO ₂ para distintos valores de R _{ph}	57
Figura 4.3 - Cápsulas da técnica de PFT	60
Figura 4.4 - Consumo de oxigénio e produção de dióxido de carbono em função da actividade física	64
Figura 4.5 - Variação da absorvância de alguns gases em função do comprimento de onda	65
Figura 4.6 - Detecção de CO ₂ por espectroscopia não-dispersiva de infravermelho	66
Figura 5.1 - Planta do apartamento B	69
Figura 5.2 - Planta do apartamento T	70
Figura 5.3 - Termo-higrómetro Digital	71
Figura 5.4 - Detector de CO ₂ - Telaire 7001 ligado ao “data logger”	72
Figura 5.5 - “Data logger” - Hobo U12	72
Figura 5.6 - Quarto T - Valores de cCO ₂ , Hr _{int} , Hr _{ext} , T _{int} , T _{ext} obtidos de 14 a 22 de Fevereiro	74
Figura 5.7 - Quarto T - Valores de cCO ₂ , Hr _{int} , Hr _{ext} , T _{int} , T _{ext} obtidos de 22 de Fevereiro a 2 de Março	75
Figura 5.8 - Quarto T - Valores de cCO ₂ , Hr _{int} , Hr _{ext} , T _{int} , T _{ext} obtidos de 2 a 11 de Março	76
Figura 5.9 - Quarto T - Valores de cCO ₂ , Hr _{int} , Hr _{ext} , T _{int} , T _{ext} obtidos de 11 a 20 de Março	77
Figura 5.10 - Quarto T - Valores de cCO ₂ , Hr _{int} , Hr _{ext} , T _{int} , T _{ext} obtidos de 20 a 30 de Março	78
Figura 5.11 - Quarto B - Valores de cCO ₂ , Hr _{int} , Hr _{ext} , T _{int} , T _{ext} obtidos de 14 a 22 de Fevereiro	79

Figura 5.12 - Quarto B - Valores de $c\text{CO}_2$, Hr_{int} , Hr_{ext} , T_{int} , T_{ext} obtidos de 22 de Fevereiro a 2 de Março	80
Figura 5.13 - Quarto B - Valores de $c\text{CO}_2$, Hr_{int} , Hr_{ext} , T_{int} , T_{ext} obtidos de 2 a 11 de Março	81
Figura 5.14 - Quarto B - Valores de $c\text{CO}_2$, Hr_{int} , Hr_{ext} , T_{int} , T_{ext} obtidos de 11 a 20 de Março	82
Figura 5.15 - Quarto B - Valores de $c\text{CO}_2$, Hr_{int} , Hr_{ext} , T_{int} , T_{ext} obtidos de 20 a 30 de Março	83
Figura 6.1 - Relação entre a variação da concentração de CO_2 e a ocupação do compartimento	86
Figura 6.2 - Decaimento do CO_2 no Quarto T - 15 de Fevereiro	88
Figura 6.3 - Decaimento do CO_2 no Quarto T - 18 de Fevereiro	88
Figura 6.4 - Decaimento do CO_2 no Quarto T - 24 de Fevereiro	89
Figura 6.5 - Decaimento do CO_2 no Quarto T - 27 de Março	89
Figura 6.6 - Decaimento do CO_2 no Quarto T - 28 de Março	89
Figura 6.7 - Decaimento do CO_2 no Quarto T - 29 de Março	90
Figura 6.8 - Taxa de renovação horária do quarto T	92
Figura 6.9 - Decaimento do CO_2 no Quarto B - 15 de Fevereiro	93
Figura 6.10 - Decaimento do CO_2 no Quarto B - 21 de Fevereiro	93
Figura 6.11 - Decaimento do CO_2 no Quarto B - 26 de Fevereiro	93
Figura 6.12 - Decaimento do CO_2 no Quarto B - 27 de Fevereiro	94
Figura 6.13 - Decaimento do CO_2 no Quarto B - 6 de Março	94
Figura 6.14 - Decaimento do CO_2 no Quarto B - 9 de Março	94
Figura 6.15 - Decaimento do CO_2 no Quarto B - 13 de Março	95
Figura 6.16 - Taxa de renovação horária do quarto B	97
Figura 6.17 - Estado estacionário no quarto T - 15 de Fevereiro	99
Figura 6.18 - Estado estacionário no quarto T - 21 de Fevereiro	99
Figura 6.19 - Estado estacionário no quarto T - 22 de Fevereiro	100
Figura 6.20 - Estado estacionário no quarto T - 1 de Março	100
Figura 6.21 - Estado estacionário no quarto T - 3 de Março	100
Figura 6.22 - Estado estacionário no quarto T - 4 de Março	101
Figura 6.23 - Estado estacionário no quarto T - 5 de Março	101
Figura 6.24 - Estado estacionário no quarto T - 7 de Março	101
Figura 6.25 - Estado estacionário no quarto T - 20 de Março	102
Figura 6.26 - Estado estacionário no quarto T - 24 de Março	102
Figura 6.27 - Taxas de renovação horária - Quarto T	103
Figura 6.28 - Estado estacionário no quarto B - 15 de Fevereiro	105
Figura 6.29 - Estado estacionário no quarto B - 17 de Fevereiro	105
Figura 6.30 - Estado estacionário no quarto B - 23 de Fevereiro	105
Figura 6.31 - Estado estacionário no quarto B - 1 de Março	106
Figura 6.32 - Estado estacionário no quarto B - 2 de Março	106
Figura 6.33 - Estado estacionário no quarto B - 4 de Março	106

Figura 6.34 - Estado estacionário no quarto B - 5 de Março	107
Figura 6.35 - Estado estacionário no quarto B - 6 de Março	107
Figura 6.36 - Estado estacionário no quarto B - 10 de Março	107
Figura 6.37 - Estado estacionário no quarto B - 11 de Março	108
Figura 6.38 - Taxas de renovação horária - Quarto B	109
Figura 6.39 - Comparação entre a curva experimental e a curva calculada - 1 de Março - Quarto T	111
Figura 6.40 - Comparação entre a curva experimental e a curva calculada - 3 de Março - Quarto T	111
Figura 6.41 - Comparação entre a curva experimental e a curva calculada - 5 de Março - Quarto T	111
Figura 6.42 - Relação entre curvas experimentais e curvas calculadas para diferentes valores de R_{ph}	112
Figura 6.43 - Extrapolação da concentração de CO ₂ - 25 de Março - Quarto B	113
Figura 6.44 - Extrapolação da concentração de CO ₂ - 30 de Março - Quarto B	114
Figura 6.45 - Concentrações de CO ₂ no quarto T durante a permanência do ocupante	116
Figura 6.46 - Concentrações de CO ₂ no quarto B durante a permanência dos ocupantes	117
Figura 7.1 - Concentração de CO ₂ no quarto T : 1 ocupante, $V = 42 \text{ m}^3$	123
Figura 7.2 - Concentração de CO ₂ no quarto B : 2 ocupantes, $V = 35 \text{ m}^3$	123

Índice de quadros

Pág

Quadro 3.1 - Actividades e correspondente produção de vapor de água	34
Quadro 3.2 - Concentrações máximas de referência de poluentes no interior de edifícios em Portugal, de acordo com o RSECE	35
Quadro 3.3 - Produtos derivados da madeira utilizados como materiais de construção e algumas das suas aplicações mais comuns	37
Quadro 3.4 - Níveis de qualidade do ar no interior de um espaço confinado	42
Quadro 3.5 - Caudais mínimos de ar novo no interior de edifícios em Portugal (RSECE)	44
Quadro 4.1 - “Poluição” causada pelos ocupantes humanos	51
Quadro 4.2 - Actividade metabólica correspondente a várias acções	63
Quadro 5.1 - Características dos apartamentos	69
Quadro 5.2 - Características de funcionamento do detector de CO ₂ - Telaire 7001	72
Quadro 5.3 - Especificações do “data logger” - Hobo U12	72
Quadro 6.1 - Cálculo de R _{ph} pelo método 1 - Quarto T - 15 de Fevereiro	90
Quadro 6.2 - Cálculo de R _{ph} pelo método 1 - Quarto T - 18 de Fevereiro	90
Quadro 6.3 - Cálculo de R _{ph} pelo método 1 - Quarto T - 24 de Fevereiro	90
Quadro 6.4 - Cálculo de R _{ph} pelo método 1 - Quarto T - 27 de Março	90
Quadro 6.5 - Cálculo de R _{ph} pelo método 1 - Quarto T - 28 de Março	91
Quadro 6.6 - Cálculo de R _{ph} pelo método 1 - Quarto T - 29 de Março	91
Quadro 6.7 - Valores da taxa de renovação horária do quarto T	91
Quadro 6.8 - Cálculo de R _{ph} pelo método 1 - Quarto B - 15 de Fevereiro	95
Quadro 6.9 - Cálculo de R _{ph} pelo método 1 - Quarto B - 21 de Fevereiro	95
Quadro 6.10 - Cálculo de R _{ph} pelo método 1 - Quarto B - 26 de Fevereiro	95
Quadro 6.11 - Cálculo de R _{ph} pelo método 1 - Quarto B - 27 de Fevereiro	95
Quadro 6.12 - Cálculo de R _{ph} pelo método 1 - Quarto B - 6 de Março	96
Quadro 6.13 - Cálculo de R _{ph} pelo método 1 - Quarto B - 9 de Março	96
Quadro 6.14 - Cálculo de R _{ph} pelo método 1 - Quarto B - 13 de Março	96
Quadro 6.15 - Valores da taxa de renovação horária do quarto B	96
Quadro 6.16 - Cálculo de R _{ph} - Quarto T	103
Quadro 6.17 - Cálculo de R _{ph} - Quarto B	109
Quadro 6.18 - Valores mínimos, máximos e médios de concentração de CO ₂ (ppm) ao longo de uma semana - Quarto T	116
Quadro 6.19 - Valores mínimos, máximos e médios de concentração de CO ₂ (ppm) ao longo de uma semana - Quarto B	117
Quadro 7.1 - Valores de R _{ph} do quarto T	121
Quadro 7.2 - Valores de R _{ph} do quarto B	121

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento do tema

A qualidade de vida da população de uma comunidade é indissociável dos níveis de qualidade do ar que respira. Nas sociedades contemporâneas, em que grande parte do tempo é passado em espaços fechados, a qualidade do ar interior dos edifícios assume uma relevância especial, na medida em que a respiração de um ar poluído tem comprovados efeitos negativos no bem-estar das pessoas, afectando-lhes a saúde, o conforto e a produtividade.

A par da indispensável redução dos factores de poluição e renovação do ar com o oxigénio indispensável para o metabolismo dos ocupantes, uma ventilação eficaz é um factor determinante na manutenção de uma elevada qualidade do ar interior, não só para a segurança das pessoas, mas também para diminuir as anomalias associadas aos elementos construtivos decorrentes de condensações internas ou superficiais. A promoção de uma boa qualidade do ar interior dos edifícios deverá pois constituir uma preocupação constante para todos aqueles que assumem responsabilidades, sejam de natureza política, sejam de natureza técnico-científica, consoante o relacionamento profissional existente nas diversas áreas envolvidas.

Nas últimas três décadas, o aumento dos níveis de vida da população portuguesa tem conduzido a uma maior exigência de conforto a nível habitacional, nomeadamente de protecção contra o ruído e redução de fluxos de ar indesejáveis, principalmente no Inverno, período em que o ar frio proveniente do exterior implica o recurso ao aquecimento, com os custos energéticos e económicos associados. Paralelamente, na sequência da crise petrolífera da década de setenta do século vinte e em virtude da dependência energética dos combustíveis fósseis importados, foi implementada em Portugal uma política de redução do consumo de recursos energéticos, que inicialmente se deveu sobretudo a razões económicas, mas que

actualmente é universalmente aceite como indispensável para assegurar um desenvolvimento sustentável.

As circunstâncias referidas acima levaram, entre outras medidas, à adopção de novas práticas construtivas, de que são exemplo a impermeabilização das caixas de estore e a introdução do isolamento térmico nas envolventes exteriores, o que conjuntamente com a utilização de caixilharias de alto desempenho, contribui para uma maior eficiência energética dos edifícios.

As alterações socioeconómicas ocorridas nos últimos trinta anos em Portugal, com destaque para a crescente presença feminina no mercado laboral, provocaram modificações significativas nos hábitos de vida da população. Muitas habitações passaram a estar desocupadas durante grande parte do dia, pelo que a tradicional abertura das janelas pela manhã destinada a arejar os compartimentos, deixou de ser efectuada regularmente. Por outro lado, assistiu-se a uma crescente utilização de novos materiais de construção e equipamentos, de que são exemplo os produtos derivados da madeira, os polímeros, as alcatifas e os aparelhos electrónicos, que constituem fontes emissoras de substâncias altamente poluentes do ambiente interior.

A conjugação das circunstâncias expostas pode conduzir a uma redução significativa da qualidade do ar interior nos edificios residenciais em Portugal, com as consequências que lhe estão associadas. Para evitar a ocorrência de tais situações, os níveis de ventilação das habitações devem ser tais que os valores da concentração dos diversos poluentes existentes no local sejam inferiores aos valores mínimos de referência.

A legislação Portuguesa com referências específicas à ventilação natural compreende o Regulamento sobre o Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), [1], e a norma portuguesa NP 1037-1 [2]. O RCCTE, revisto em 2006 e que transpõe parcialmente a Directiva Europeia n.º2002/91/CE, estabelece para as fracções autónomas dos edificios de habitação uma taxa de ventilação mínima, igual ou superior a 0,6 renovações de ar por hora. A norma portuguesa NP 1037-1 de 2001, que define as regras a que devem obedecer os sistemas de ventilação natural dos edificios de habitação, recomenda a instalação em cada compartimento principal de dispositivos de entrada de ar. Como esta recomendação da norma tem sido pouco levada em consideração [3], é importante conhecer os valores efectivos das taxas de renovação de ar das habitações de construção recente, em particular dos quartos de dormir onde as pessoas passam grande parte do tempo.

1.2 Objectivos e Metodologia

O presente trabalho tem como objectivo a avaliação dos níveis da qualidade do ar interior de quartos de dormir de duas habitações em edifícios multifamiliares, de construção recente, localizados no concelho de Lisboa.

A avaliação será feita com base em dois indicadores, nomeadamente a taxa de renovação horária dos compartimentos em estudo e os valores máximos da concentração de dióxido de carbono atingidos durante a noite.

As taxas de renovação horária serão determinadas experimentalmente pelo método do gás traçador recorrendo à técnica do decaimento e à técnica do estado estacionário, utilizando o dióxido de carbono produzido pelo metabolismo dos ocupantes. A aplicação das duas técnicas tem como objectivo perceber qual corresponde a uma metodologia mais adequada e com menos limitações no caso de estudo, em que o processo de medições decorrerá sem alterações significativas nos hábitos diários dos moradores.

Para a consecução dos objectivos traçados proceder-se-á à monitorização contínua da concentração interior de dióxido de carbono ao longo de 45 dias da estação de aquecimento. Será utilizado o método de detecção por espectroscopia não-dispersiva de infravermelho, NDIR, recorrendo a sensores de feixe duplo colocados em cada um dos compartimentos.

Capítulo 2

Ventilação dos edifícios

2.1 Introdução

No presente capítulo é feita a revisão dos principais conceitos gerais relacionados com a ventilação dos edifícios. Com o propósito de contextualizar a situação actual, é inicialmente apresentada uma breve descrição da evolução da ventilação ao longo dos tempos. Seguidamente analisa-se o processo da ventilação natural, sobre o qual incide o presente trabalho. São considerados diversos aspectos respeitantes à ventilação natural, nomeadamente a adaptação da sua prática à mudança de estilo de vida das populações e o efeito da acção do vento e da acção térmica. É apresentado o conceito de renovação horária, R_{ph} , como indicador usual da taxa de ventilação. Por fim, procede-se à revisão de alguns princípios fundamentais no estudo da ventilação natural/mista e das disposições legais aplicáveis em Portugal a dispositivos de admissão de ar em edifícios de habitação.

2.2 Contextualização histórica

A ventilação natural existe desde sempre e, até ao advento da revolução industrial, foi o único processo através do qual era assegurada a ventilação dos edifícios.

No passado, a ventilação natural era tradicionalmente utilizada nos países de clima quente, para refrescar as habitações, recorrendo aos mecanismos da acção do vento e da acção térmica, [4]. No Médio Oriente por exemplo, a ventilação, durante o primeiro milénio, era assegurada com recurso às torres eólicas “badghir”. Um dos mecanismos utilizados na construção das torres consiste no aproveitamento do efeito de sucção (pressões negativas) criado pelos ventos mais intensos acima do edifício. A existência de uma abertura a uma cota baixa gera uma corrente de ar ascendente, sendo o arrefecimento da massa de ar conseguido

pela sua passagem através de pequenos espelhos de água (Figura 2.1). O ar seco que passa sobre a água aumenta a velocidade de evaporação, o que devido à elevada variação de entalpia de vaporização (calor latente) da água provoca um arrefecimento da massa de ar circulante.

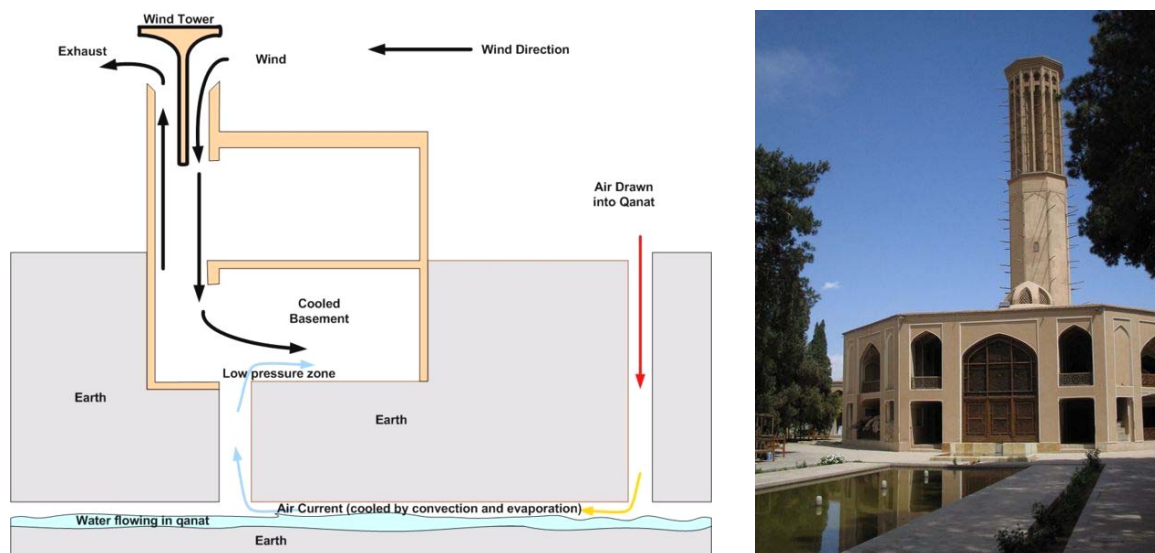


Figura 2.1 – Ventilação natural por torres eólicas no Médio Oriente (“badghir”).

Na Europa, as técnicas de ventilação natural foram também desenvolvidas de modo a aproveitar as brisas frescas de Verão, que eram encaradas como uma potencial forma de arrefecimento. As habitações eram providas de aberturas nas fachadas viradas aos ventos dominantes de Verão, de modo a possibilitar a entrada de ar fresco. Nos países da Europa do Norte e Europa Central, a ventilação natural era também essencial para remover o fumo produzido pelas lareiras e fogões a lenha, [4].

Apesar das técnicas descritas, nos séculos dezoito e dezanove a ventilação de compartimentos interiores particularmente pequenos era muito deficiente, No início do século vinte começaram a ser desenvolvidos os primeiros aparelhos de ar condicionado, mas foi apenas no final da década de 1950, com o desenvolvimento económico e tecnológico ocorrido no pós-guerra, que se verificou uma aplicação intensiva da ventilação mecânica, principalmente nos edifícios comerciais. A possibilidade de controlo da climatização do ar ambiente e a disponibilidade de energia fóssil barata vieram introduzir alterações profundas nas estratégias de ventilação. Na década de 60 é constituída a ASHRAE, que se torna a principal autoridade mundial em sistemas de aquecimento, arrefecimento e ventilação; as duas principais normas emitidas por esta associação, a norma 62 e a norma 55, sobre ventilação e conforto dos utentes dos edifícios são fundamentalmente orientadas para a ventilação

mecânica dos espaços interiores. O uso de sistemas de ventilação natural passa a estar reservado praticamente às habitações e a pequenos edifícios comerciais, ao mesmo tempo que se assiste a uma mudança de paradigma no conceito da ventilação, a qual passa a poder ser controlada pelos utilizadores independentemente dos factores climáticos.

A crise petrolífera dos anos setenta veio modificar a visão sobre o modo como eram consumidos os recursos energéticos não renováveis e introduzir a noção de “poupança de energia” nas estratégias de ventilação dos edifícios, reforçada nas décadas seguintes com a tomada de consciência de que a redução da queima de combustíveis fósseis para produção de energia não se deve apenas ao facto das suas reservas serem limitadas, mas também ao impacte ambiental negativo causado pela emissão de gases responsáveis pelo aumento do efeito de estufa. A necessidade de restringir o consumo de energia na ventilação dos edifícios levou a que arquitectos e engenheiros passassem a considerar a utilização de sistemas de ventilação mistos, em que a ventilação natural assume novamente um papel importante.

Em Portugal, tal como nos restantes países ocidentais, a alteração dos hábitos de vida ao longo dos últimos anos, levou a que a ocupação das habitações deixasse de ser permanente, estando, na maior parte dos casos, desocupadas um elevado número de horas durante o dia. Assim, ao contrário do que acontecia até aos anos 70 do século passado, a abertura das janelas durante o dia com o propósito de ventilar os compartimentos deixou de ser efectuada regularmente. Simultaneamente, os avanços tecnológicos possibilitaram o desenvolvimento de caixilharias de alto desempenho, com permeabilidade ao ar muito reduzida, diminuindo acentuadamente as infiltrações, que no caso das habitações construídas anteriormente eram responsáveis por possibilitarem taxas de ventilação muito elevadas devidas à grande quantidade de frinchas então existentes. Ao mesmo tempo, tornou-se bastante comum a utilização nas cozinhas de “exaustor” sobre o fogão, em substituição da captação de fumos tradicional, do que resulta um caudal de escoamento próximo de zero quando o exaustor não está em funcionamento. Na prática pode considerar-se que no sector residencial o sistema de ventilação deixou de ser completamente natural passando a ser um sistema misto, com predomínio da ventilação natural, [3].

A preocupação em estabelecer valores mínimos para os caudais de admissão de ar novo existe desde meados do século XVIII. A figura 2.1 mostra a título de exemplo a evolução dos valores da taxa de ventilação recomendada para os edifícios, nos Estados Unidos da América, EUA, entre 1836 e 1996.

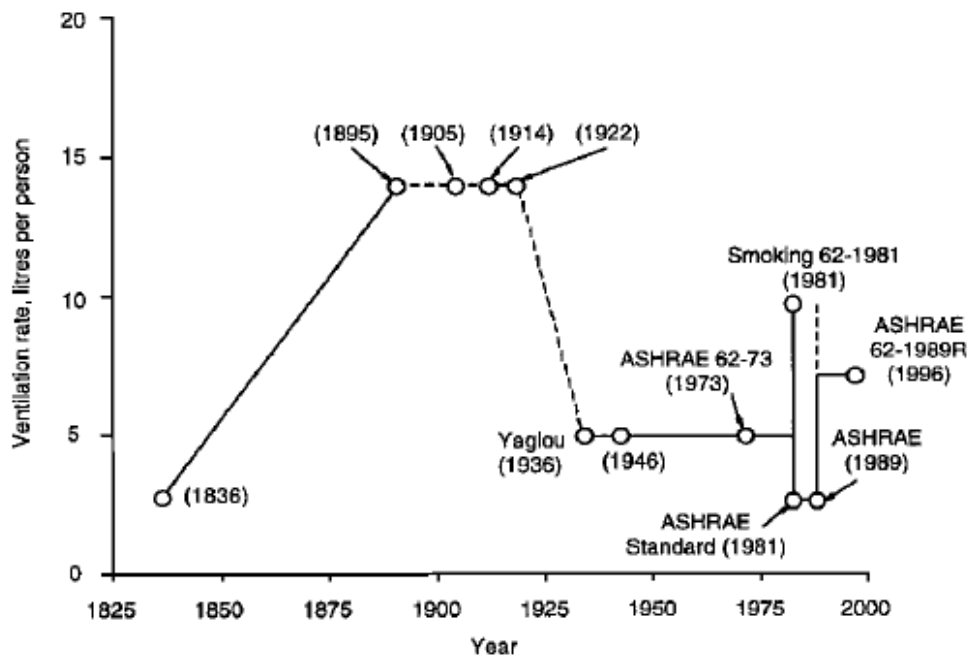


Figura 2.2 – Evolução dos valores mínimos das taxas de ventilação nos EUA [4]

Como se pode observar na figura 2.2, os valores mínimos recomendados para a taxa de ventilação nos EUA têm sofrido grandes alterações ao longo dos anos. Este facto deve-se a um conjunto de factores condicionantes, como sejam alterações na concepção dos edifícios, desenvolvimento tecnológico, mudanças no estilo de vida das populações e custo da energia no período de tempo a que a regulamentação corresponde.

Verifica-se que entre 1836 e 1895 os valores recomendados para o caudal de admissão de ar novo aumentam progressivamente desde aproximadamente $2,5 \text{ l.s}^{-1}$ por pessoa até cerca de 13 l.s^{-1} por pessoa, tendo-se mantido neste valor até 1922. Em 1936, com base nos estudos efectuados pelo investigador Yaglou, o valor de referência diminui acentuadamente para 4 l.s^{-1} por pessoa, permanecendo inalterado após a Segunda Guerra Mundial (1946) e com a publicação da norma 62 da ASHRAE em 1973. Este valor de referência tão reduzido, entre 1936 e 1973, evidencia a falta de conhecimento sobre as implicações que uma reduzida taxa de ventilação tem na saúde, o que pode ser explicado, em grande parte, pela quase inexistência de factores poluidores no ar interior. Em 1981, na sequência da crise energética da década de setenta, aquela norma diminui o valor recomendado para cerca de $2,5 \text{ l.s}^{-1}$ por pessoa, passando, contudo, o valor de referência para os espaços interiores em que é permitido fumar a ser 10 l.s^{-1} por pessoa.

Na década de 90 do século passado, o conceito de “edifício doente” (Sick Building ou SB) e a “síndrome do edifício doente” (Sick Building Syndrome ou SBS), relacionados maioritariamente com edifícios de serviços com sistemas de ventilação mecânica, voltaram a focar a atenção dos especialistas nas estratégias a adoptar na ventilação dos edifícios. Desde

essa altura, que uma ventilação deficiente é considerada como um factor contributivo para a SBS, embora possa não ser a causa principal (as partículas acumuladas nos sistemas de filtragem da ventilação mecânica devido à falta de manutenção são responsáveis em muitos casos pela falta de qualidade do ar interior), [4]. Como consequência desta situação, a revisão da norma 62 da ASHRAE em 1996, introduz a alteração do valor de referência para cerca de $7,5 \text{ l.s}^{-1}$ por pessoa, valor que se mantém actualmente.

2.3 Conceitos gerais sobre ventilação

A ventilação é o processo pelo qual é introduzido ar “limpo” num espaço e é removido o ar “poluído”. Promover a saúde e o conforto dos ocupantes são as duas razões essenciais que estão na base da ventilação dos edifícios. De forma a atingir estes objectivos, um sistema de ventilação, segundo as orientações em vigor, deve cumprir os seguintes critérios:

- assegurar um fornecimento adequado de ar (oxigénio) para o metabolismo humano;
- assegurar um fornecimento adequado de ar (oxigénio) para que ocorra a combustão completa nos processos de queima de combustível, (caso se verifique a existência de tais equipamentos);
- manter os valores da concentração dos produtos resultantes da respiração e dos bioefluentes dos ocupantes (seres humanos e/ou animais) inferiores aos valores de referência;
- manter a concentração das substâncias poluentes produzidas nas actividades dos ocupantes e/ou pelos materiais de construção e equipamentos existentes no local em valores inferiores aos recomendados na legislação em vigor;
- assegurar as condições de humidade relativa interior adequadas para que não ocorram condensações e que permitam aos ocupantes ter uma sensação de conforto;
- remover a carga térmica em excesso gerada pelas pessoas, iluminação e outros equipamentos existentes no local;
- evitar criar movimentos de ar que possam estar na origem da sensação de desconforto por parte dos ocupantes.

A ventilação necessária a um edifício ou compartimento pode ser conseguida quer com recurso a um processo de ventilação natural, quer com recurso a um processo de ventilação mecânica. Segundo a definição da ASHRAE, designa-se por ventilação natural a que ocorre devido à produção de diferenças de pressão naturais ou artificiais, enquanto a ventilação

mecânica ocorre na presença de ventiladores e condutas de admissão e exaustão, [5]. Quando os dois processos coexistem, a ventilação é designada por mista ou híbrida.

As entradas não controladas de ar exterior no edifício através de aberturas não intencionalmente realizadas na envolvente, são normalmente designadas por infiltrações de ar, ou, no contexto da ventilação, simplesmente infiltrações. Alguns autores consideram que o termo “ventilação” pressupõe um processo intencional e por esse motivo, as infiltrações, enquanto fluxos de ar não controlados, não deveriam ser incluídas. Outros documentos, como é caso da Norma 62-2001 da ASHRAE, consideram as infiltrações como uma componente da ventilação, embora distinta da ventilação natural que implica a existência de renovação do ar através de aberturas propositadamente criadas para esse efeito. No presente trabalho adoptar-se-á este último critério de nomenclatura. Como as infiltrações de ar podem conduzir a um sobredimensionamento de ventilação (com o conseqüente excesso de energia consumida), estes fluxos de ar não deverão ser ignorados, sendo necessário proceder a uma estimativa dos seus valores.

Todas as fendas e fissuras existentes na envolvente de um edifício contribuem para a ocorrência de infiltrações, mas as aberturas que mais significativamente promovem esse processo são:

- as frinchas nos caixilhos das janelas e nas portas da envolvente;
- as caixas de estores;
- as frinchas e aberturas nas portas divisórias interiores.

2.3.1 Ventilação natural

A ventilação natural ocorre devido à existência de um diferencial de pressões entre duas zonas de um volume de ar, o que provoca um fluxo de ar da zona de pressão mais elevada para a zona de baixa pressão. As acções que dão origem ao diferencial de pressão mencionado são duas:

- a acção do vento, que gera uma diferença de pressões estáticas no interior dos edifícios ou compartimentos;
- a acção térmica, que origina uma variação de pressão devida ao gradiente de densidade do ar resultante de diferentes temperaturas interior/exterior - o chamado “efeito chaminé”.

- **A acção do vento na ventilação natural**

A ventilação promovida pela acção do vento na envolvente do edifício depende de diversos factores, tais como:

- diferença de pressão entre o interior e o exterior na zona das aberturas existentes;
- modo de escoamento do fluxo de ar através das aberturas;
- compartimentação do espaço interior.

Quando se refere que a acção do vento é geradora de um diferencial de pressões no interior do edifício, isto deve-se ao facto de o vento ser um fluxo de ar atmosférico também ele gerado por um diferencial de pressões decorrente de várias condicionantes geoclimáticas. Estas condicionantes podem ser enquadradas em três escalas distintas, [6]:

- uma escala global, à dimensão da Terra, e que envolve a forma do planeta, os seus movimentos de rotação e de translação em torno do Sol e ainda balanços termodinâmicos envolvendo a superfície terrestre, a superfície marítima e a atmosfera e que são determinantes aos movimentos de grandes massas de ar características de cada zona do globo;
- uma escala regional em que é preponderante a orografia do território e a sua localização mais marítima ou mais continental. As brisas marítimas ou terrestres e os ventos indutores de chuva, com os ciclos próprios do período anual ou diário, enquadram-se neste nível;
- uma escala local em que as condicionantes são decorrentes da interacção entre os efeitos que influenciam à escala regional e existência de urbanização, de florestas ou de grandes massas de águas entre outros.

Como o objectivo do presente trabalho não passa pela análise do problema da ventilação à escala global ou regional, de seguida, serão apenas abordados os aspectos relacionados com a interferência vento/edifício.

- **Interferência vento/edifício**

A influência do vento num processo de ventilação natural depende sobretudo de dois factores:

- a intensidade do vento, que está condicionada pelo local e pela envolvente exterior ao edifício;

- a distribuição de pressões na envolvente, resultante da forma do edifício e da sua orientação em relação ao fluxo de ar.

Na interacção fluxo de ar/edifício, a alteração no campo de velocidades do ar provoca uma distribuição de pressões não uniforme. De um modo muito geral pode dizer-se que ocorrem pressões positivas na fachada do edifício exposta ao vento (barlavento), e pressões negativas na fachada oposta (sotavento) e nas laterais, como se representa na figura 2.3. Este facto provoca a entrada de ar pelas aberturas a barlavento deslocando-se através do interior do edifício das áreas de alta pressão para as áreas de baixa pressão, [6], [7]. Os caudais de ar que atravessam as aberturas de um edifício, nestas condições, dependem da diferença de pressões existente entre a face exposta ao vento e a face oposta.

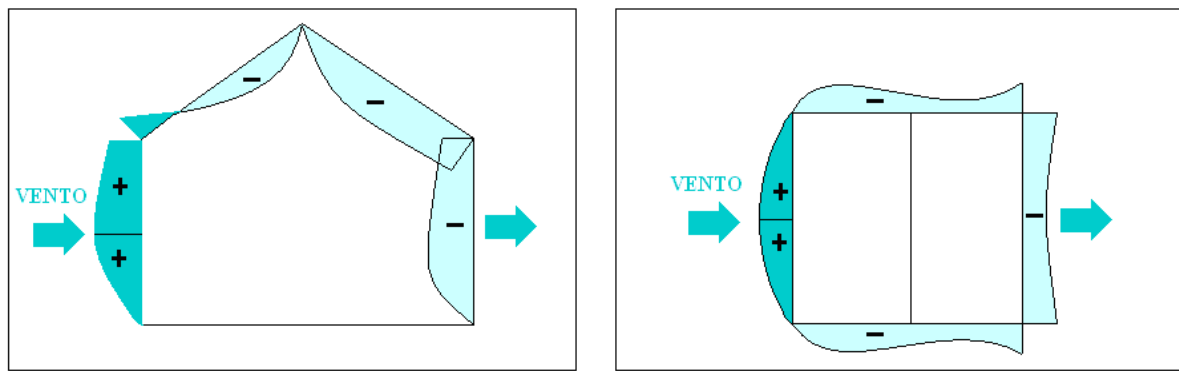


Figura 2.3 – Distribuição de pressões nas fachadas de um edifício de planta rectangular (vista em corte vertical e vista em planta)

O efeito da interferência do vento com o edifício, do ponto de vista da ventilação, depende do modo como ocorre a distribuição de pressões nas fachadas e cobertura, que por sua vez é decorrente da forma do edifício, da existência de obstáculos na vizinhança, da rugosidade do terreno e da direcção predominante do vento e do seu perfil de velocidades. Verifica-se que alterações de pormenor na configuração global do edifício podem provocar alterações nos valores de pressão num mesmo local da envolvente.

A distribuição de pressões exteriores é normalmente apresentada sob a forma de um coeficiente de pressão exterior, δp_e , adimensional, dado pela expressão, [8]:

$$\delta p_e = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho \cdot v_\infty^2} \quad (2.1)$$

com:

- p : valor local da pressão num ponto da envolvente do edifício [Pa]

- p_{∞} : pressão atmosférica [Pa]
- ρ : massa volúmica do ar [kg.m^{-3}]
- v_{∞} : velocidade do vento à altura do beiral [m.s^{-1}]

O coeficiente de pressão apresenta valores positivos ou negativos consoante a pressão local seja superior ou inferior à pressão atmosférica. Valores positivos de δp_e correspondem a localizações favoráveis à admissão de ar e valores negativos correspondem a localizações adequadas à colocação de extractores, podendo contudo o balanço entre o diferencial de pressões e as áreas de passagem conduzir a que haja admissão de ar em locais de δp_e negativo, nos casos em que a zona não dispõe de valores de sucção elevados, [6]. A determinação dos coeficientes de pressão é feita em laboratório através de ensaios em túnel de vento; sendo os valores para as situações comuns estipulados na regulamentação em função da intensidade do vento no local (zonamento do território), da altura acima do solo e da rugosidade do terreno, das características geométricas do edifício e da direcção do vento, [9]. Nas figuras 2.4 e 2.5 apresentam-se exemplos de distribuição do campo de pressões nas fachadas de alguns edifícios.

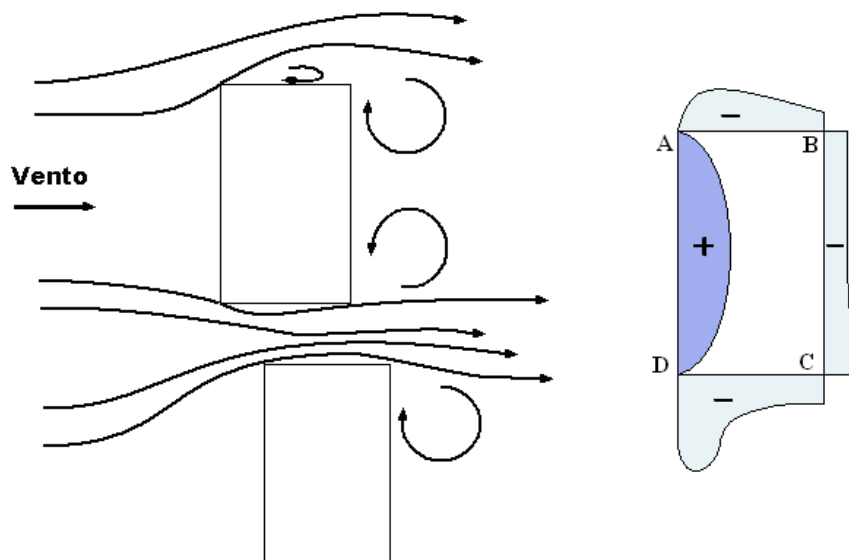


Figura 2.4 – Interferência no escoamento de dois edifícios lado a lado e distribuição de pressões em torno de um deles [6]

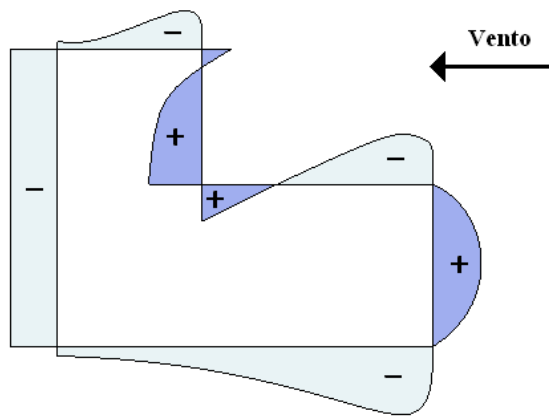


Figura 2.5 – Distribuição de pressões nas fachadas de um edifício de planta em L (vista em planta) [6]

Nas camadas mais baixas da atmosfera, o vento caracteriza-se por variações aleatórias da velocidade pelo que é normalmente caracterizado por um valor médio de velocidade e de direcção para um determinado intervalo de tempo.

- **A acção térmica na ventilação natural**

A ocorrência de uma diferença de temperatura entre o exterior e o interior de um edifício resulta na diferença dos correspondentes valores de densidade do ar, originando um gradiente de pressões. Existindo comunicação entre o espaço interior e exterior por aberturas a diferentes cotas, é induzida uma diferença de pressão Δp_h [Pa], que depende da diferença de temperatura e da diferença de cotas entre as aberturas e que pode ser calculada pela expressão, [4], [8]:

$$\Delta p_h = T_0 \times g \times h \times \rho_o \cdot \left(\frac{1}{T_{ext}} - \frac{1}{T_{int}} \right) \quad (2.2)$$

com:

- h : diferença de cotas entre as linhas médias das aberturas [m];
- ρ_o : densidade do ar a 273K [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].
- g : aceleração da gravidade [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$];
- T_{ext} : temperatura do ar exterior [K]
- T_{int} : temperatura do ar interior [K]
- T_0 : temperatura de referência [K]

A figura 2.6 apresenta a título de exemplo o diagrama da pressão induzida por acção térmica entre duas aberturas situadas no mesmo plano vertical.

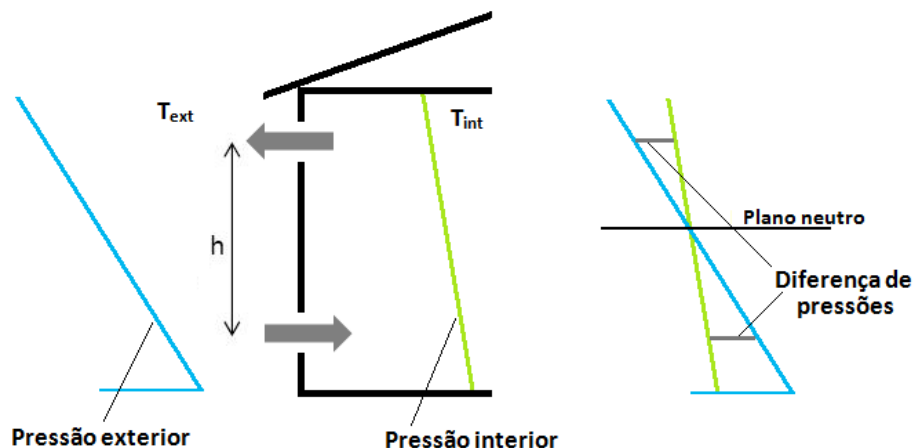


Figura 2.6 – Pressão induzida por acção térmica entre duas aberturas situadas no mesmo plano vertical

Quando a temperatura do ar interior é superior à do ar exterior o fluxo de ar no interior do edifício é ascendente e tem o sentido oposto quando a temperatura interior é menor do que a exterior, como se representa na figura 2.7.

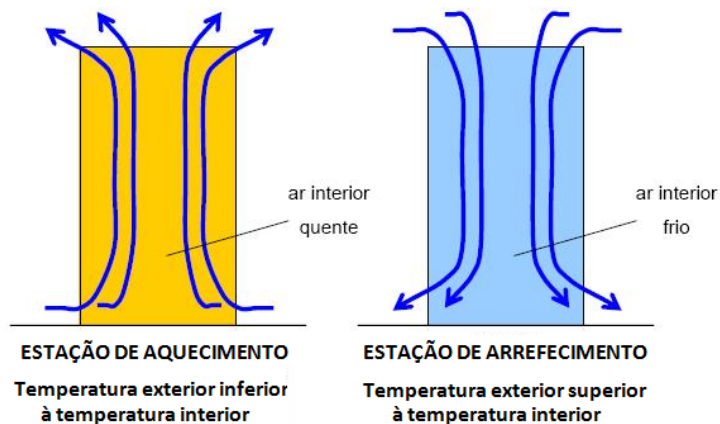


Figura 2.7 – Fluxos de ar devidos à acção térmica

Este mecanismo de fluxo de ar por acção térmica ocorre não só através de aberturas propositadamente concebidas para o efeito de ventilação mas também através de frinchas na envolvente, sendo induzido por qualquer processo de aquecimento interior.

- **Acção combinada do vento e do gradiente de temperatura**

Na concepção dos sistemas de ventilação natural é fundamental assegurar que os efeitos da acção do vento e da acção térmica se complementam, tentando inviabilizar situações de acções opostas. Na prática, é inevitável a ocorrência de combinações de vento e temperaturas que conduzam a caudais de ventilação ou demasiado intensos ou demasiado fracos. Através do conhecimento do modo como ocorre ao longo do tempo a distribuição de pressões geradas por cada um dos mecanismos é possível determinar a localização mais vantajosa para as aberturas de ventilação para cada edifício em particular.

A acção térmica só promove uma ventilação natural eficaz quando o diferencial entre a temperatura média no interior do edifício e a temperatura exterior for superior a 8 °C. Nos restantes períodos do ano admite-se que seja a acção do vento a garantir, em regra, a renovação do ar no interior dos edifícios [10].

- **Taxa de Renovação horária R_{ph}**

A taxa de ventilação de um edifício é normalmente traduzida em termos de caudal volúmico de ar, ou caudal volúmico de ventilação, Q , expresso em $l.s^{-1}$ ou $m^3.h^{-1}$. Actualmente considera-se a ventilação como o processo de providenciar a renovação de ar aos ocupantes de um edifício mais do que ao edifício propriamente dito, com o objectivo de assegurar uma boa qualidade de ar com o mínimo custo e impacte ambiental. Assim, é também muito utilizado o conceito de caudal volúmico de ventilação por pessoa.

Outro indicador usual na quantificação da taxa de ventilação de espaços interiores é o número de renovações horárias, R_{ph} . Este indicador, que será utilizado no presente trabalho, é também designado na literatura por taxa de renovação horária ou simplesmente, renovação horária (“Air Change Rate”- ACR). O número de renovações horárias está relacionado com o caudal volúmico de ventilação pela equação 2.3:

$$R_{ph} = \frac{Q}{V} \quad (2.3)$$

com:

- R_{ph} : número de renovações horárias [h^{-1}];
- Q : caudal volúmico de ventilação [$m^3.h^{-1}$];
- V : volume efectivo do espaço [m^3].

A renovação horária pode ser entendida como o número de vezes que o ar de um espaço é renovado em cada hora. No entanto, dizer que a renovação horária é igual a 1 h^{-1} significa que o volume total de ar exterior que passa pelo espaço fechado numa hora é igual ao volume desse espaço e não necessariamente que todo o ar interior seja completamente renovado.

Na equação 2.3 o caudal volúmico de ventilação pode ser considerado como o volume de ar admitido na zona considerada ou como o volume de ar evacuado da zona considerada. Estes volumes não são necessariamente iguais. Dependendo da diferença de temperatura entre o interior e o exterior as diferenças entre aqueles volumes podem ir até 10% [11]. O volume efectivo, V , corresponde ao volume onde o ar realmente circula, excluindo do volume total do espaço em estudo o volume ocupado pela mobília, equipamentos, armários e outros em que haja estagnação de ar.

Num edifício/compartimento naturalmente ventilado a renovação horária pode sofrer grandes variações diárias, chegando a registar-se alterações de 1 para 3 devidas apenas a alterações nas condições atmosféricas [11], [12]. Como é evidente, sempre que há abertura das janelas ou das portas, o valor da R_{ph} aumenta significativamente. Por estes motivos, um valor de R_{ph} determinado num intervalo de tempo sob condições definidas é válido apenas para o intervalo de tempo em que decorreu a medição, sendo designado como renovação horária efectiva, não sendo correcto admitir a sua generalização a outros períodos de tempo, ainda que semelhantes.

2.3.2 Ventilação natural/mista conjunta em edifícios de habitação

Em 2000, no âmbito de um projecto da responsabilidade da Universidade do Porto, um grupo de investigadores procedeu à realização de um inquérito com o objectivo de avaliar como estavam a ser implementados os sistemas de ventilação dos edifícios de habitação em construção no Norte de Portugal [3]. Da análise deste inquérito, que incidiu sobre 2693 construções, das quais 93% correspondiam a edifícios de habitação colectiva com tipologias predominantes do tipo T2 e T3, resultaram as seguintes conclusões principais:

- verificou-se a falta de preocupação de dotar os fogos de dispositivos específicos para a admissão de ar novo nos quartos e salas; menos de 20% dos inquéritos referiram a utilização de grelhas nesses compartimentos;
- a extracção de ar era realizada mecanicamente (em regime contínuo ou intermitente), em aproximadamente 60% das instalações sanitárias e 80% das cozinhas;

Os investigadores concluíram que em grande parte dos edifícios em Portugal de construção recente, não são cumpridas as taxas de renovação de ar recomendadas, sendo

portanto fundamental o desenvolvimento de projecto de ventilação em edifícios de habitação. Os investigadores responsáveis pelo estudo elaboram ainda um conjunto de princípios a seguir na concepção de um sistema de ventilação habitacional misto (ventilação com predomínio natural mas com utilização de “exaustor”), que se apresenta seguidamente:

- a admissão de ar novo aos quartos e salas deve fazer-se através de aberturas permanentes do tipo auto-reguláveis (para garantir a ventilação geral e permanente);
- todos os compartimentos de serviço devem obrigatoriamente dispor de extracções cujo somatório dos caudais seja da ordem de 0,7 a 0,8 renovações por hora;
- o sistema deve funcionar na estação de aquecimento, não estando dependente da abertura das janelas;
- a abertura das janelas na estação de arrefecimento é necessária devido à ventilação por tiragem térmica ser muito reduzida. As janelas devem preferencialmente estar situadas em fachadas opostas de modo a aproveitar o mais possível os diferenciais de pressão originados pelo vento;
- as janelas e as portas devem ter uma permeabilidade criteriosamente controlada, conforme a classe de exposição ao vento;
- não é permitida a coexistência de exaustores e aparelhos de combustão do tipo B (esquentadores e caldeiras), recomendando-se a localização destes em compartimento separado (dispensa ou lavandaria) com ventilação separada;
- deve ser assegurada a coordenação do projecto de ventilação com o projecto de Arquitectura e com os outros projectos de especialidades de engenharia, relativos ao edifício em estudo.

2.4 Legislação Portuguesa sobre ventilação natural

A legislação portuguesa com referências específicas à ventilação natural compreende os dois seguintes documentos:

- o Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios, RCCTE, [1], aprovado pelo Decreto-Lei n.º80/2006 e que transpõe parcialmente a Directiva Europeia n.º2002/91/CE. O RCCTE estabelece a taxa de referência para a renovação do ar nas fracções autónomas dos edifícios de habitação em $0,6 \text{ h}^{-1}$, como garantia da qualidade do ar interior.
- a norma portuguesa NP 1037-1 de 2001, que tem por objectivo definir as regras a que devem obedecer os sistemas de ventilação natural dos edifícios de habitação, e quantifica as exigências de ventilação através de caudais-tipo, estabelecidos com base

em critérios de qualidade do ar interior quando os compartimentos principais e de serviço se encontram em plena utilização. Para os compartimentos principais é recomendado um caudal-tipo mínimo de uma renovação por hora (o caudal-tipo deve ser entendido à luz da respectiva norma, como um elemento de dimensionamento e não como um caudal a assegurar fisicamente [2]).

De acordo com a norma NP1037-1, um projecto de ventilação natural deve observar os seguintes pontos fundamentais:

- as aberturas permanentes para admissão de ar, devem ser auto-reguláveis e estar colocadas na envolvente dos compartimentos principais (salas e quartos);
- a extracção natural deve ser feita a nível dos compartimentos de serviço (instalações sanitárias e cozinha).
- a comunicação entre estes espaços deve ser garantida através de passagens de ar adequadas.
- deve ser efectuado o correcto dimensionamento das entradas e saídas de ar.

É de salientar que antes da publicação desta norma (que apenas ocorreu em 2001), a concepção dos sistemas de ventilação natural baseava-se no conjunto de recomendações contidas na publicação do LNEC, “Ventilação Natural de Edifícios de Habitação”, [10].

Capítulo 3

Ventilação e Qualidade do Ar Interior

3.1 Introdução

A ventilação tem um papel fundamental na reposição e manutenção da concentração adequada de oxigénio para a respiração do seres humanos e para o funcionamento dos aparelhos de combustão. A ventilação, por outro lado, assume uma função determinante ao permitir assegurar as adequadas condições higrotérmicas e a boa qualidade do ar interior dos edifícios pela diluição e remoção das substâncias poluentes.

Como é sabido, as substâncias químicas produzidas pelas pessoas e suas actividades essenciais, pelos materiais de construção e pelos equipamentos dos edifícios podem estar na origem da diminuição da qualidade do ar interior nos edifícios. Nos últimos anos, ao mesmo tempo que se procedeu à diminuição progressiva da taxa de renovação do ar das habitações, verificou-se uma crescente aplicação de novos materiais de construção e de equipamentos em todos os tipos de edifícios (edifícios residenciais, comerciais ou escritórios, escolas e hospitais), Sendo conhecido o facto de alguns dos novos materiais de construção e equipamentos de interiores (incluindo os próprios sistemas de aquecimento e ar condicionado) constituírem fontes de diversas substâncias poluidoras, é importante definir estratégias de ventilação adequadas à preservação dos níveis de QAI.

A melhor estratégia para melhorar a QAI consiste na eliminação das fontes de substâncias poluidoras tal como já era defendido pelo cientista alemão Pettenkofer, que afirmava em meados do século dezanove: “Se existe um monte de estrume num espaço, não recorra à ventilação para remover o cheiro, remova o monte de estrume”, [13]. Quando esta estratégia não dá resultados satisfatórios, a melhoria da QAI deve ser realizada através do controlo das taxas de concentração dos poluentes, com recurso a ventilação.

A primeira parte do presente capítulo é dedicada à análise das principais substâncias poluentes do ar interior e dos seus efeitos na saúde e conforto dos ocupantes. Posteriormente, são feitas algumas considerações sobre os métodos normalmente utilizados para a avaliação da qualidade do ar interior num edifício e sobre a determinação do caudal de ventilação adequado à satisfação simultânea de critérios de saúde e de conforto dos seus ocupantes. É analisada em particular a utilização do dióxido de carbono produzido pelos ocupantes dos compartimentos como indicador da qualidade do ar interior.

3.2 Substâncias poluentes do ar interior/efeitos na saúde e conforto dos ocupantes

Além de assegurar o fornecimento do oxigénio indispensável ao metabolismo dos ocupantes, a ventilação dos espaços interiores é fundamental para diminuir a concentração das substâncias poluentes produzidas por diversas actividades, como sejam [14]:

- a actividade fisiológica humana com produção de bioefluentes, tais como dióxido de carbono, produtos gasosos odorosos e vapor de água;
- a preparação de alimentos;
- as combustões em aparelhos a gás, lareiras e outros;
- a lavagem e a secagem da roupa;
- a utilização das instalações sanitárias;
- a libertação de vapores por materiais de construção e mobiliário;
- o uso de produtos de limpeza, especialmente de desinfectação.

São muitas e muito diversas as substâncias que contribuem para a má qualidade do ar interior. As substâncias potencialmente poluentes podem ter origem no interior ou no exterior, e podem ser produzidas e libertadas pelos ocupantes dos edifícios nas suas actividades essenciais e/ou pelos materiais de construção e/ou equipamentos dos edifícios.

Um dos processos utilizados para diminuir a concentração de uma substância poluente no ar interior de um edifício consiste na eliminação do maior número possível de fontes poluidoras, pelo que uma possível classificação dos poluentes do ar interior pode ser feita em função da (in)evitabilidade da sua ocorrência. Pode considerar-se como poluentes de produção inevitável os que estão associados ao metabolismo dos ocupantes e suas actividades essenciais, e como poluentes de produção evitável ou minimizável todos aqueles que podem

ser associados a emissões de materiais de construção e equipamentos ou à sua deficiente utilização.

3.2.1 Poluentes de ocorrência inevitável no ar interior dos edifícios

Os principais poluentes considerados como inevitáveis no espaço interior de um edifício ou compartimento são o dióxido de carbono, CO₂, os biofluentes e o vapor de água, H₂O.

- **Dióxido de carbono, CO₂**

A principal fonte de dióxido de carbono no ar interior é o metabolismo dos ocupantes; outras fontes comuns são os aparelhos de combustão como os fogões, os esquentadores e as caldeiras para aquecimento de águas e as lareiras.

Como foi referido nos objectivos do presente trabalho, o dióxido de carbono é o gás seleccionado para a determinação experimental das taxas de ventilação e para a avaliação da qualidade do ar interior de quartos de dormir de duas habitações. Por este motivo, a sua análise enquanto substância presente no interior dos edifícios será feita com mais detalhe na secção 3.3.3, após a introdução de outros conceitos necessários para o seu correcto enquadramento.

- **Biofluentes (Odores)**

Os odores são resultantes dos biofluentes humanos (e animais) e das actividades inerentes associadas à ocupação de um espaço como preparação de alimentos, produção de lixo e utilização das instalações sanitárias. O odor corporal é emitido pelo suor e por secreções sebáceas através da pele e do sistema digestivo. Apesar da sensação de odores não ser agradável normalmente não afecta directamente a saúde dos ocupantes de um espaço.

A relação entre os níveis de percepção de odores pelos ocupantes e a qualidade de ar interior de um edifício será desenvolvida na secção seguinte.

- **Vapor de água**

O vapor de água é um constituinte do ar, sendo variável a sua proporção. No que diz respeito ao ar interior, a quantidade de vapor de água presente no ar depende em grande medida do metabolismo das pessoas e das actividades distintas realizadas no respectivo espaço. No quadro seguinte estão indicadas algumas das actividades mais comuns realizadas no interior das habitações e a correspondente produção de vapor de água em g/dia.

Quadro 3.1 – Actividades e correspondente produção de vapor de água. [14]

Actividade	Vapor de água [g/dia]
Cozinhar a electricidade	2000
Cozinhar a gás	3000
Lavagem de loiça	400
Banho (por pessoa)	200
Lavagem de roupa	500
Secagem de roupa no interior de um compartimento (por pessoa)	1500

Se o vapor de água *per se* não representa risco para a saúde dos ocupantes, há estudos que mostram que quanto mais baixa for a humidade relativa do ar de um espaço melhor será a percepção de qualidade do ar dos seus habitantes. No entanto, uma humidade relativa baixa está associada ao aumento dos riscos de infecções das vias respiratórias ao passo que níveis altos de humidade relativa podem causar desconforto relacionado com o suor [4].

3.2.2 Poluentes de ocorrência evitável ou minimizável no ar interior dos edifícios

Existem centenas de substâncias presentes no ar interior dos edifícios que podem ter um efeito nocivo para a saúde dos ocupantes a curto ou a longo prazo. Algumas dessas substâncias têm sido objecto de estudos sistemáticos com a intenção de determinar as principais fontes e conhecer os efeitos produzidos nos seres humanos e nos animais. Os resultados obtidos permitiram desenvolver materiais de construção alternativos menos agressivos para a qualidade do ar interior que, aplicados com base em procedimentos padrão, permitem anular ou minimizar a emissão dessas substâncias. Apresenta-se a seguir uma listagem dos principais poluentes do ar interior de um edifício cuja ocorrência pode ser evitável ou pelo menos minimizável; a ordem pela qual são enunciados não está relacionada com a maior ou menor perigosidade pois todos representam um factor de risco para a saúde. Refere-se no entanto o monóxido de carbono em primeiro lugar por ser a substância que apresenta a maior toxicidade a curto prazo.

- monóxido de carbono, CO;
- óxidos de azoto, NO_x;
- dióxido de enxofre, SO₂;
- compostos orgânicos voláteis, COV;
- formaldeído, CH₂O;
- ftalatos;

- partículas suspensas no ar;
- ozono, O₃;
- radão, Rn;
- fumo de tabaco.

Em Portugal, as concentrações máximas de referência de poluentes no interior dos edifícios são fixadas por lei. O Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios de 4 de Abril de 2006, RSECE, [15], estabelece os valores limite para seis tipos de poluentes (Quadro 3.2).

Quadro 3.2 – Concentrações máximas de referência de poluentes no interior de edifícios em Portugal, de acordo com o RSECE, [15].

Parâmetros	Concentração máxima permitida [mg.m ⁻³]
Partículas suspensas no ar (PM10)	0,15
Dióxido de carbono (CO ₂)	1800
Monóxido de carbono (CO)	12,5
Ozono (O ₃)	0,2
Formaldeído (CH ₂ O)	0,1
Compostos Orgânicos Voláteis Totais	0,6

Seguidamente destacam-se os compostos orgânicos voláteis e o formaldeído, devido à importância que lhes é atribuída por alguns investigadores enquanto substâncias poluidoras do ar interior. Essas substâncias são libertadas maioritariamente por materiais de construção, equipamentos e mobiliário actualmente muito utilizados nos edifícios.

- **Compostos Orgânicos Voláteis**

A designação “Composto Orgânico Volátil”, COV, é aplicada aos compostos de carbono cujo ponto de ebulição à pressão normal é suficientemente baixo para que a sua vaporização à temperatura ambiente ocorra rapidamente e que, estando presentes na atmosfera, podem contribuir, devido a reacções fotoquímicas, para a formação de ozono troposférico (ozono prejudicial) e para a destruição da camada do ozono estratosférico (ozono benéfico). As principais fontes de COV no interior dos edifícios são, [16]:

- tintas e vernizes, colas e solventes;
- alcatifas e papel de parede;

- mobiliário;
- fotocopiadoras (toner);
- produtos de limpeza;
- produtos de higiene pessoal e cosmética.

Devido à elevada volatilidade destes compostos, as moléculas dos COV que fazem parte da composição de muitos materiais presentes no interior dos edifícios vão sendo libertadas ao longo do tempo e passam para o ar interior respirável pelos ocupantes, constituindo um dos principais factores da má qualidade do ar responsável pela síndrome dos “Edifícios Doentes”. A emissão é mais intensa quando a aplicação dos materiais de construção é recente, devido à maior quantidade de COV que neles estão presentes, diminuindo ao longo do tempo. Por outro lado, no caso dos materiais sólidos, como mobiliário, têxteis e revestimento de soalhos, a emissão de COV é inicialmente menos intensa, mas mantém-se durante um maior período de tempo.

Os principais efeitos na saúde registados são, por ordem decrescente de frequência de sintomas, irritação da garganta, dores de cabeça, distúrbios visuais, lesões do fígado e dos rins e aumento do risco de cancro.

De acordo com o RSECE, a concentração máxima admissível é definida para os “compostos orgânicos voláteis totais” (COVT), o que inclui um vasto número de substâncias moleculares tais como aldeídos (acetaldeído e formaldeído), cetonas e hidrocarbonetos como benzeno, tolueno e xileno. Apesar do formaldeído estar incluído no grupo dos COV, é considerado separadamente devido aos seus efeitos nocivos na saúde e à utilização de um método diferente de medição da concentração.

- **Formaldeído**

O formaldeído, CH_2O , pode entrar no corpo por inalação, ingestão ou por absorção através da pele. Uma vez no interior do corpo reage rapidamente com os tecidos que contêm hidrogénio, afectando-os. Pensa-se que o formaldeído pode apresentar riscos cancerígenos para os seres humanos, no entanto não há resultados que o comprovem, [4], [8]. Além do provável risco de neoplasias, outras perturbações observadas são alergias, irritação da pele, irritação dos olhos e vias respiratórias e alterações neurológicas (dores de cabeça, fadiga e depressão).

Tal como sucede com os outros compostos orgânicos voláteis, as emissões de formaldeído no interior dos edifícios, dependem da idade dos materiais existentes no seu interior. As emissões mais elevadas são as dos materiais mais recentes devido à presença nestes de moléculas de formaldeído livre. É normalmente utilizado como “aglutinante” nos

compósitos de madeira e na manufactura de têxteis com o objectivo de melhorar o seu comportamento, nomeadamente impedir que encolham, enruguem e a cor desvaneça.

As fontes emissoras de formaldeído nos edificios incluíam tradicionalmente o fumo de tabaco, os produtos de limpeza e as combustões de querosene em aquecedores. Actualmente, as fontes mais significativas são os produtos derivados de madeira em que é aplicada resina ureia-formaldeído, [4], [17]. Os derivados de madeira em que é utilizada resina fenólica emitem formaldeído a uma taxa menor dos que contêm ureia-formaldeído. As placas de aglomerados de fibras são considerados os materiais de construção cuja emissão de formaldeído é mais elevada, [17].

No quadro 3.3 apresentam-se alguns dos derivados de madeira utilizados como materiais de construção emissores de formaldeído e algumas das suas aplicações mais comuns.

Quadro 3.3 – Produtos derivados da madeira utilizados como materiais de construção e algumas das suas aplicações mais comuns.

Produtos derivados da madeira	Aplicações
Aglomerados de partículas de madeira	Base de soalhos Armários e prateleiras
Painéis de contraplacado, MDF e aglomerados de alta densidade	Revestimento de paredes Estantes
Aglomerados de fibras de madeira	Revestimento e tampos de móveis

3.2.3 Asma e doenças alérgicas

A incidência de doenças alérgicas e asmáticas duplicou nos países desenvolvidos nas últimas duas décadas, [13]. Estas doenças representam um dos maiores problemas actuais de saúde pública, envolvendo avultados custos em medicamentos, tratamentos e absentismo.

No âmbito de uma investigação realizada em 2004 e 2005 na Suécia, com objectivo de estudar a relação entre a qualidade do ar interior e a ocorrência de doenças respiratórias como a asma e doenças alérgicas, foram analisados parâmetros físicos, químicos, biológicos e médicos de 11000 crianças [13]. Os resultados mostraram que o aumento da taxa de renovação do ar reduz os riscos de alergia. O mesmo estudo evidenciou também uma relação entre o risco de asma e a concentração de ftalatos.

Com o objectivo de avaliar e caracterizar a qualidade do ar das habitações portuguesas, a Sociedade Portuguesa de Alergologia e Imunologia Clínica (SPAIC) e o Instituto UCB de Alergia (IoA) lançaram no final de 2007 o projecto “HabitAr”. Segundo presidente da SPAIC,

Morais de Almeida, “nas últimas décadas tem-se assistido a uma crescente prevalência de doenças respiratórias, principalmente nas populações urbanas, o que pode estar amplamente associado a factores existentes no interior das habitações. Animais domésticos, ácaros, fungos, alterações na humidade do ar, partículas em suspensão e o caudal da ventilação do ar podem causar inflamação das vias respiratórias superiores e inferiores”, [18].

3.3 Avaliação da qualidade do ar interior

Na especificação da qualidade do ar interior existem normalmente dois requisitos, [16]:

- o risco para a saúde dos ocupantes ao respirarem o ar do compartimento deve ser desprezável;
- o ar deve ser sentido fresco e agradável.

Para obter uma boa qualidade do ar interior, as condições de ventilação adequadas à redução dos efeitos adversos à saúde dos ocupantes resultante dos poluentes existentes no ar devem ser tratadas separadamente das condições de ventilação para obter uma percepção satisfatória da QAI tendo em conta que a verificação de um dos critérios poderá não corresponder necessariamente à verificação do outro. As concentrações dos diversos poluentes podem ser inferiores aos valores limites para constituírem perigo para a saúde e mesmo assim os ocupantes manifestarem-se insatisfeitos com a QAI.

3.3.1 A qualidade do ar interior e a saúde dos ocupantes

Um dos métodos utilizados para avaliar a qualidade do ar interior dos edifícios, com o propósito de reduzir o risco para a saúde dos ocupantes, consiste na determinação da taxa de produção dos poluentes existentes. Como não é conhecido o modo como o conjunto das substâncias poluentes afecta a qualidade do ar interior, estas são geralmente consideradas separadamente, sendo a taxa de ventilação determinada para cada um dos poluentes.

Com o objectivo de definir, por via analítica, as taxas de ventilação necessárias para a satisfação das condições de saúde dos ocupantes, são desenvolvidos modelos matemáticos mais ou menos complexos consoante o grau de exigência do método.

Considerando que a homogeneização do ar interior é completa, e que se verifica uma distribuição uniforme da espécie química poluidora, o balanço de caudais de ventilação, expressos em termos volúmicos, que traduz a lei da conservação da massa do ar e da espécie química em análise, é dado pela equação:

$$V \frac{dc(t)}{dt} + Q \cdot c(t) = Q \cdot c_{ext} + q - E \quad (3.1)$$

com:

- V : volume do espaço confinado [m^3]
- $c(t)$: concentração volúmica da espécie química no espaço confinado (m^3 de espécie por m^3 de ar)
- t : tempo [s]
- Q : caudal de ventilação [$m^3 \cdot s^{-1}$]
- c_{ext} : concentração volúmica da espécie química no exterior [-]
- E : caudal volúmico de remoção da espécie química (por meios que não a ventilação) [$m^3 \cdot s^{-1}$]
- q : caudal volúmico de emissão da espécie química [$m^3 \cdot s^{-1}$]

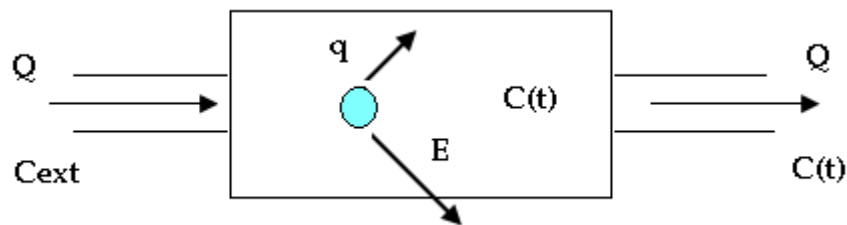


Figura 3.1 – Representação esquemática dos fluxos de uma espécie química num espaço confinado bem homogeneizado (adaptado de [19])

No estabelecimento desta expressão admite-se que quer a temperatura interior quer a temperatura exterior são constantes e uniformes, o que implica que as densidades correspondentes não variam no tempo e que o caudal de ventilação é aproximadamente constante.

Por simplicidade, aborda-se seguidamente a situação correspondente a um comportamento em regime permanente (a concentração da espécie poluidora é constante ao longo do tempo). Nesta situação, a equação 3.1 toma a seguinte forma:

$$Q \cdot c_{int} = Q \cdot c_{ext} + q - E \quad (3.2)$$

a qual pode ser reescrita, ficando:

$$c_{int} = c_{ext} + \frac{q - E}{Q} \quad (3.3)$$

em que c_{int} representa a concentração volúmica da espécie química no interior do compartimento.

Da análise desta equação pode registar-se as seguintes observações:

- a concentração da espécie química poluidora no ar interior, c_{int} , não pode ser inferior à sua concentração no exterior, c_{ext} , (ou mais concretamente à concentração com que é introduzida no compartimento);

- a concentração da espécie química poluidora pode ser controlada actuando em três parâmetros: no caudal de emissão q , no caudal de remoção, E , e no caudal de ventilação, Q .

Como foi referido anteriormente, a estratégia que deve ser considerada preferencialmente é o controlo da taxa de emissão do poluente, quer por eliminação total das fontes de poluição, quer por substituição dessas fontes por outras menos poluidoras. Esta opção tem sido experimentada com sucesso na implementação de edifícios com muito baixa poluição interior, [13].

Outra estratégia que permite reduzir a concentração da espécie poluidora consiste em aumentar a taxa de remoção por processos que não passem necessariamente pela ventilação. Segundo Fanger, a introdução de novos materiais de construção e de revestimento de mobiliário com capacidade de adsorver substâncias poluidoras pode ser uma alternativa [13]. O mesmo investigador refere que este processo é preferível à remoção dos poluentes por sistemas de filtragem química ou física através da recirculação do ar. Esta preferência prende-se com o facto dos sistemas de retenção de partículas necessitarem de uma manutenção periódica para evitar que os materiais particulados sejam libertados posteriormente no ar interior. No entanto a eficácia do processo de adsorção das substâncias poluidoras pelos materiais de revestimento não foi comprovada, pelo que a estratégia frequentemente utilizada para manter a concentração dos poluentes dentro dos valores limite regulamentares faz-se com recurso à diluição através da substituição do “ar viciado” com “ar puro”.

Os valores admissíveis de concentração dos poluentes do ar no interior dos edifícios encontram-se especificados em normas e regulamentos. Em Portugal, como foi referido na secção 3.2, os valores limite são estabelecidos pelo RSECE para seis tipos de poluentes [15].

Um outro documento de referência é a Norma 62 da ASHRAE, [5], que refere valores limite em termos de: (a) concentração máxima permitida (“threshold limit values” ou TLV), (b) valores limite de curta exposição, (“short-term exposure limit” ou STEL) e (c) valores de concentração média ponderada no tempo (“time weighted average concentration” ou TWA).

Existem centenas ou até mesmo milhares de substâncias químicas no ar, apresentando em alguns casos valores muito reduzidos de concentração, e a informação existente sobre os seus efeitos na saúde e no conforto dos ocupantes é bastante limitada [13]. Os valores disponíveis dizem respeito apenas a algumas dezenas de produtos e só são aplicáveis correctamente se for admitido que a substância em análise é a única presente no espaço [20]. Na realidade, as concentrações em que os diversos poluentes estão presentes no ar interior de um determinado espaço podem estar dentro dos limites máximos admissíveis para não constituírem perigo para a saúde dos ocupantes, mas mesmo assim os ocupantes demonstrarem insatisfação em relação à qualidade do ar interior. Por essas razões, os métodos frequentemente utilizados para a determinação da taxa de ventilação mínima necessária para assegurar a saúde dos ocupantes podem não ser suficientes para garantir uma boa qualidade do ar interior. Assim sendo, no projecto de ventilação de um compartimento ou edifício é necessário avaliar separadamente as condições de ventilação para reduzir o risco de saúde em relação a um determinado contaminante e a ventilação para obter uma percepção de qualidade de ar satisfatória, [16].

3.3.2 A qualidade do ar interior e o conforto dos ocupantes

O ser humano possui duas capacidades distintas para perceber a qualidade do ar: o sentido do olfacto da cavidade nasal e a sensibilidade das mucosas do nariz e dos olhos. A combinação destas duas capacidades permite que o ser humano se aperceba se o ar inalado é “fresco” e agradável ou “pesado” e irritante.

Nas décadas de vinte e trinta do século vinte, o cientista Yaglou realizou medições sensoriais com vários grupos de pessoas, com o objectivo de usar directamente as suas respostas sensoriais para avaliar a qualidade do ar interior [13]. Com o mesmo intuito de comprovar que a percepção da qualidade do ar interior depende do odor e das propriedades irritantes do ar, foram desenvolvidos estudos por Fanger em 1998 [13], cujos resultados lhe permitiram desenvolver unidades de medida para quantificação das respostas sensoriais: o “olf” para a quantidade de poluição libertada e o “decipol” (dp) para o nível de poluição perceptível. Por definição, um olf é a quantidade de poluição produzida por uma pessoa padrão (actividade sedentária e com sensação térmica neutra). A intensidade de todas as fontes de poluição (sob o ponto de vista sensorial da qualidade do ar) pode ser expressa em número de pessoas equivalente (olf), ou seja, o número de pessoas padrão necessário para criar uma atmosfera em que a percentagem de insatisfeitos seja igual à da fonte de poluição a caracterizar. O decipol (dp) é definido como a quantidade de poluição libertada por uma pessoa padrão sujeita a um caudal de ventilação de 10 l.s^{-1} de ar não poluído, [14], [21].

Na sequência do trabalho de Fanger, a qualidade do ar passou a ser expressa utilizando a percentagem previsível de pessoas que se manifestam insatisfeitas com a percepção que têm da qualidade do ar imediatamente após entrarem no compartimento. O relatório técnico europeu CR 1752 de 1998 [22], que especifica as exigências e método de expressar a qualidade do ar interior em edifícios (excluindo-se edifícios de habitação e aplicações industriais), estabelece três classes de conforto distintas relacionadas com a percepção de qualidade de ar. As três classes, designadas com A, B e C, correspondem a diferentes percentagens de pessoas insatisfeitas, respectivamente <15%, <20% e <30% e a caudais de ventilação recomendados de 10, 7 e 4 l/(s.pessoa), como mostra o quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Níveis de qualidade do ar no interior de um espaço confinado

Classe	Percepção da qualidade do ar	
	Insatisfeitos (%)	q [l.s ⁻¹]
A	15	10
B	20	7
C	30	4

Para uma atmosfera poluída pela ocupação humana, a percentagem de ocupantes insatisfeitos pode se prevista pela expressão 3.4:

$$PD = 395 \cdot e^{-1,83q^{0,25}} \quad \text{para } q \geq 0,32 \text{ l/(s.olf)} \quad (3.4)$$

$$PD = 100 \% \quad \text{para } q < 0,32 \text{ l/(s.olf)}$$

com:

- *PD*: percentagem previsível de ocupantes insatisfeitos com a qualidade do ar percebida [%];

- *q*: caudal de ventilação por unidade de quantidade de poluição [l/(s.olf)].

A expressão 3.4 baseia-se em estudos realizados em 1986 na Dinamarca. Resultados semelhantes foram obtidos com estudos efectuados no Japão e na América do Norte [23]. Na figura 3.2 apresenta-se a relação entre a percentagem de pessoas insatisfeitas com a qualidade do ar percebida *PD* e o caudal de ventilação em l.s⁻¹.pessoa-padrão, *q*.

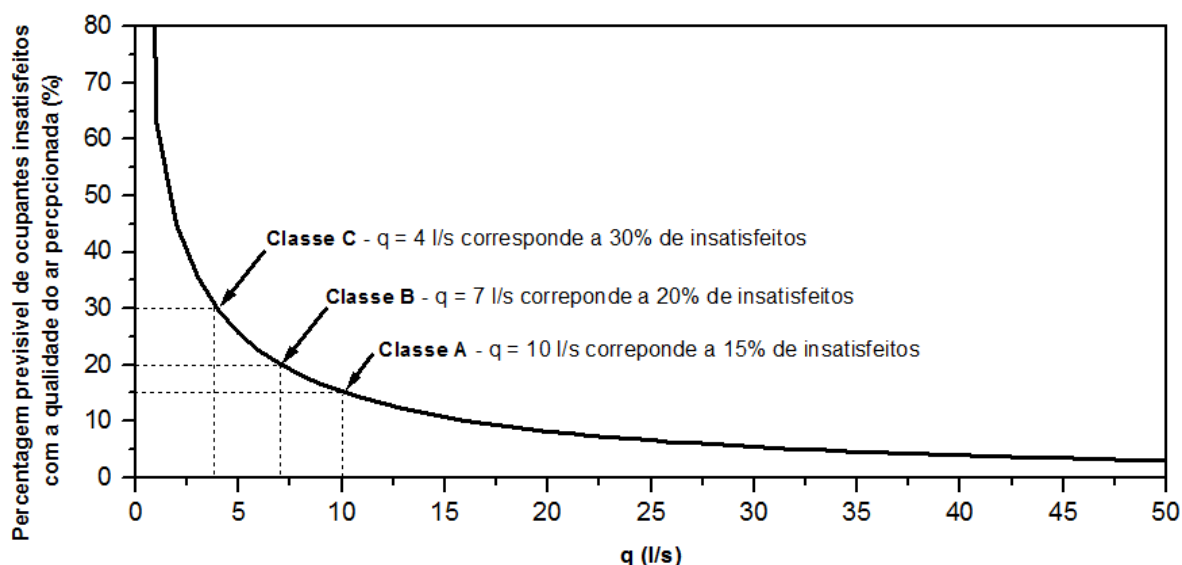


Figura 3.2 – Relação entre a percentagem de pessoas insatisfeitas com a qualidade do ar percebida e o caudal de ventilação (adaptado de [16])

Em Portugal, o “Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios”, RSECE, estipula os valores de caudais mínimos de renovação do ar interior para edifícios não residenciais e casos particulares de edifícios residenciais dotados de sistema de climatização mecânica. Embora o âmbito do presente trabalho se restrinja a sistemas de ventilação natural, apresentam-se no quadro 3.5. aqueles valores de referência.

Em resumo, a qualidade do ar num compartimento ou edifício é avaliada de modo a satisfazer simultaneamente critérios de saúde e de conforto. Os critérios de saúde devem ter em consideração a exposição dos ocupantes aos poluentes do espaço interior o que implica a sua identificação e das suas fontes e o conhecimento dos valores limite de exposição a curto e longo prazo para os diversos poluentes. Os critérios de conforto por outro lado permitem determinar taxas de ventilação que procuram minimizar as percepções desagradáveis devidas ao odor e bioefluentes dos ocupantes bem como de outros produtos originados pela actividade dos ocupantes ou pelo próprio edifício.

Quadro 3.5 – Caudais mínimos de ar novo no interior de edifícios em Portugal de acordo com o RSECE [15]

Tipo de actividade		Caudais mínimos de ar novo	
		[m ³ /(h.ocupante)]	[m ³ /(h.m ²)]
Residencial	Salas de estar e quartos	30	
Comercial	Salas de espera	30	
	Lojas de comércio		5
	Áreas de armazenamento		5
	Vestiários		10
	Supermercados	30	5
Serviço de refeições	Salas de refeições	35	
	Cafetarias	35	35
	Bares, salas de <i>cocktail</i>	35	35
	Sala de preparação de refeições	30	
Empreendimentos turísticos	Quartos/suites	30	
	Corredores/átrios		5
Entretenimento	Corredores/átrios		5
	Auditório	30	
	Zona do palco, estúdios	30	
	Café/ <i>foyer</i>	35	35
	Piscinas		10
	Ginásio	35	
Serviços	Gabinetes	35	5
	Salas de conferências	35	20
	Salas de assembleia	30	20
	Salas de desenho	30	
	Consultórios médicos	35	
	Salas de receção	30	15
	Salas de computador	30	
	Elevadores		15
Escolas	Salas de aulas	30	
	Laboratórios	35	
	Auditórios	30	
	Bibliotecas	30	
	Bares	35	
Hospitais	Quartos	45	
	Áreas de recuperação	30	
	Áreas de terapia	30	

3.3.3 A qualidade do ar interior e a concentração de CO₂

A concentração do dióxido de carbono produzido pelos ocupantes dos compartimentos é frequentemente utilizada como indicador da qualidade do ar interior, ainda que por vezes seja usada em situações em que não pode ser estabelecida uma associação específica.

Seguidamente, aborda-se a relação entre a concentração de CO₂ e a QAI de um edifício ou de um compartimento, segundo quatro vertentes:

- os efeitos na saúde provocados pela ocorrência de concentrações elevadas de CO₂;
- o impacto da concentração de CO₂ na percepção que os ocupantes têm da QAI;
- a relação entre a concentração de CO₂ e a concentração de outras substâncias poluidoras;
- a relação entre a concentração de CO₂ e a taxa de ventilação do edifício.

Relativamente aos efeitos na saúde dos ocupantes, é actualmente sabido que o dióxido de carbono tem uma reduzida toxicidade nas concentrações em que geralmente está presente nos espaços interiores. O valor de referência, considerando uma média temporal ponderada para 8 h de exposição e uma semana de trabalho de 40 h, é de 5000 ppm¹, sendo que o valor limite para períodos de curta exposição de 15 minutos é de 30000 ppm, [14], [24]. Outros estudos, porém, indicam o valor de 5000 ppm como demasiado elevado, [4].

No que respeita à associação entre a percepção que os ocupantes têm da qualidade de ar interior e a concentração de CO₂, devem ser considerados três níveis de abordagem:

- o impacto que o CO₂ *per se* tem na percepção de conforto por parte dos ocupantes;
- a relação existente entre a concentração de CO₂ e a concentração de outros poluentes;
- a relação entre a concentração de CO₂ e a ventilação do espaço.

Quanto ao primeiro aspecto, alguns investigadores indicam uma associação entre concentrações de CO₂ acima de 1000 ppm e a percepção do respectivo ambiente como do tipo “pesado”, entre outros indicadores de desconforto e irritação, [24]. Actualmente, para efeitos de conforto no que diz respeito aos odores dos bioefluentes humanos, a norma 62 da ASHRAE recomenda um valor limite de concentração de CO₂ de 700 ppm acima do valor registado no exterior, [5]. Para uma concentração exterior de 350 ppm, o valor recomendado equivale a uma concentração interior de 1050 ppm.

Na legislação portuguesa, o valor de referência definido pelo RSECE para a concentração máxima de CO₂ é 1800 mg.m⁻³, valor correspondente a aproximadamente 1000 ppm.

¹ ppm – partes por milhão em volume

No que respeita à existência ou não de uma relação entre a concentração de CO₂ e a concentração de outras substâncias poluidoras do espaço interior, isso depende obviamente das características de fontes emissoras. Como foi referido anteriormente, a taxa de produção de CO₂ pelos ocupantes dum espaço depende do número e tamanho dos ocupantes bem como da intensidade da sua actividade física. O CO₂ é portanto um bom indicador da concentração de outros poluentes nas situações em que a taxa de produção destes for também proporcional à ocupação do espaço. No entanto, muitas das substâncias poluidoras do espaço interior são produzidas a uma taxa que não é proporcional à ocupação do espaço ou que nem sequer depende dela. É o caso das substâncias emitidas pelos materiais de construção e mobiliário, do monóxido de carbono, CO, e dos poluentes provenientes do ar exterior, cuja concentração não pode ser relacionada com a concentração de CO₂. Este facto é limitativo da utilização do CO₂ como indicador da QAI. No entanto, em espaços com ocupação sedentária e nos quais a fonte poluente é exclusivamente o metabolismo humano foi constatada uma correlação entre a concentração de CO₂ do espaço e o índice de aceitabilidade do espaço em termos de odor dos bioefluentes humanos [14], [16], [23], [24].

A relação entre a qualidade do ar interior de um espaço e a percentagem previsível de ocupantes recém-chegados insatisfeitos com base na concentração de CO₂ como indicador dos bioefluentes, pode ser traduzida pela expressão [16], [23]:

$$PD = 395 \cdot \exp(-15,15 \cdot c_{CO_2}^{-0,25}) \quad (3.5)$$

em que c_{CO_2} representa a concentração de CO₂ acima da concentração exterior. Esta expressão é válida para espaços com ocupação sedentária e nos quais a fonte de poluição é exclusivamente o metabolismo humano. Esta relação encontra-se representada na figura 3.3.

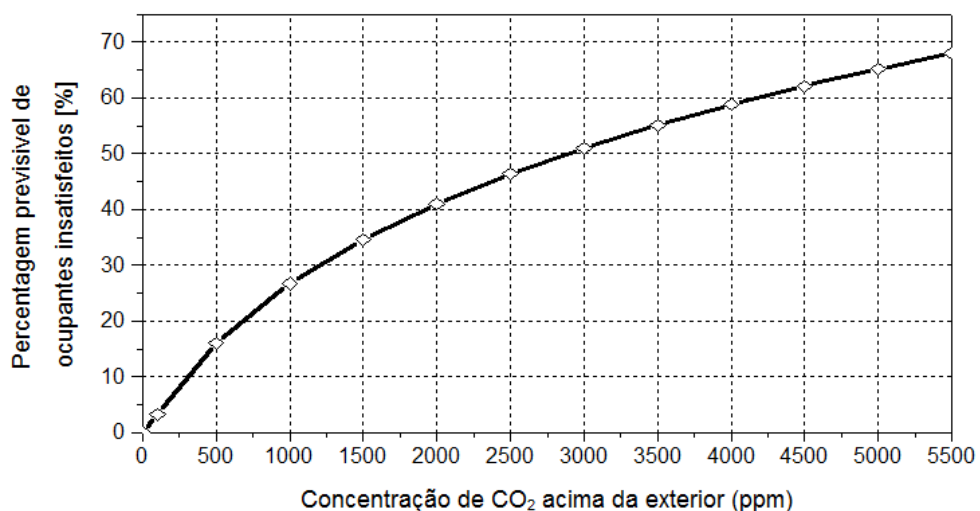


Figura 3.3 – O CO₂ como indicador da qualidade do ar (adaptado de [16])

Da observação da figura 3.3 constata-se que a concentração de CO₂ não deve exceder 700 ppm acima da concentração exterior, para que pelo menos 80% de pessoas recém-chegadas ao espaço considerem aceitável o nível dos odores corporais humanos.

A monitorização contínua da concentração interior de CO₂ de um espaço permite também avaliar a ocorrência de “picos” de concentração e estabelecer um padrão de ocupação do espaço. As variações nos valores de concentração possibilitam tirar conclusões sobre as entradas e saídas dos ocupantes e do nível e tempo de ocupação. No capítulo 4 deste trabalho, será feita a análise detalhada da utilização da concentração de CO₂ produzido pelos ocupantes num edifício ou compartimento na determinação da taxa de ventilação.

Capítulo 4

Método do gás traçador. Técnicas de medição

4.1 Introdução

No presente capítulo faz-se a apresentação do método seguido neste trabalho para a determinação das taxas de ventilação, denominado método do gás traçador. Pretende-se analisar as técnicas de medição associadas a este método, em particular as que são utilizadas neste estudo. Neste âmbito, apresentam-se os fundamentos teóricos para a determinação da taxa metabólica de produção de dióxido de carbono pelos ocupantes de um espaço interior e descreve-se o processo utilizado na detecção do dióxido de carbono por espectroscopia de radiação infravermelha.

4.2 Fundamentos teóricos do método do gás traçador

Um dos principais métodos utilizados na determinação da taxa de ventilação dos compartimentos dos edifícios é o método do gás traçador. Este método consiste na injeção de uma determinada quantidade de um gás com propriedades específicas no interior do compartimento em estudo.

A determinação da taxa de ventilação dos compartimentos que fazem objecto de estudo pode ser feita por diferentes técnicas, que, tendo em comum a medição da concentração do gás traçador ao longo do tempo, correspondem a diferentes procedimentos normalizados de emissão e controlo.

O método do gás traçador fundamenta-se na lei da conservação da massa do ar e do gás traçador, traduzida, neste caso de estudo de fluidos, pela equação de balanço mássico. Neste método admite-se que se verificam as seguintes condições:

- a concentração do gás traçador é homogénea no espaço em estudo;
- existe uma mistura perfeita e imediata entre o ar e o gás traçador (homogeneização completa);
- a produção do gás traçador não altera a densidade do ar.

Admitindo ainda que a temperatura interior e a temperatura exterior do ar são constantes e uniformes (o que implica que as respectivas densidades não variam no tempo) e que o vento é estacionário, o balanço mássico pode ser expresso em termos de caudais volúmicos pela seguinte equação diferencial, [8]:

$$V \frac{dc(t)}{dt} + Q \cdot c(t) = q \quad (4.1)$$

com:

- V : volume efectivo do espaço [m^3]
- Q : caudal de ventilação [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
- $c(t)$: concentração volúmica do gás (m^3 de gás por m^3 de ar)
- t : tempo [s]
- q : caudal volúmico de emissão do gás traçador [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

Referem-se seguidamente algumas das técnicas usadas no método do gás traçador, que serão, adiante objecto de uma análise mais aprofundada:

- Técnica do decaimento
- Técnica da emissão constante
- Técnica do estado estacionário (equilíbrio)
- Técnica da emissão constante com recolha passiva – PFT

Para cada uma das técnicas acima referidas é definido um determinado procedimento relativo às condições e ao modo como é medida a concentração do gás traçador ao longo do tempo, a que correspondem abordagens diferentes na resolução da equação de balanço de massa. Como o sucesso da aplicação deste método depende em grande medida das propriedades do gás utilizado, antes de proceder a uma análise mais pormenorizada de cada uma dessas das técnicas, serão abordados os aspectos fundamentais relacionados com as características dos gases traçadores.

4.3 Características de um gás traçador

De modo a que a determinação da renovação do ar possa ser efectuada com sucesso, o gás traçador deve, em primeiro lugar, ser fácil de detectar e constituir uma mistura homogénea com o ar num intervalo muito curto de tempo depois de libertado. Para além desses requisitos fundamentais, a escolha do gás traçador deve basear-se também no seguinte conjunto de características:

- não ser tóxico e não apresentar risco para a saúde com os valores de concentração usados;
- ser inerte;
- estar de preferência ausente (ou presente em concentrações muito baixas) no ar interior e exterior;
- ter um valor de massa molar não muito diferente do valor médio do ar ($29\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$);
- não ser inflamável nem explosivo;
- não ser dispendioso;
- não sofrer decomposição ou reagir com o ar ou com componentes do edifício.

Os gases mais frequentemente utilizados como gases traçadores são:

- Hexafluoreto de enxofre, SF_6
- Dióxido de carbono, CO_2
- Peróxido de azoto (óxido nitroso), N_2O
- Perfluorbenzeno (PB), C_6F_6
- Perfluormetilbenzeno (PMB), C_7F_8

4.3.1 O dióxido de carbono como gás traçador

Embora o dióxido de carbono não possa ser considerado como um gás traçador no sentido estrito do termo (uma vez que está presente na atmosfera), é muitas vezes utilizado com essa finalidade, em virtude de apresentar muitas das características indicadas para gás traçador. Por ordem decrescente de aspectos positivos, verifica-se em relação ao CO_2 que:

- não é dispendioso;
- não é inflamável nem explosivo;
- tem uma massa molar ($M=44\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$) relativamente próxima da massa molar média do ar ($M=29\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$), sendo a sua densidade relativa de 1,53;

- é fácil de analisar – a concentração mínima detectável é de 3 ppm, [25], [26], sendo no entanto aconselhável usar uma concentração mínima 100 vezes superior, com o objectivo de garantir que haja uma proporcionalidade directa entre os valores lidos no aparelho e a concentração;
- apresenta uma toxicidade baixa, não constituindo risco de saúde para os ocupantes do espaço desde que sejam assegurados os limites recomendados. O valor limite de exposição permitido corresponde a uma concentração máxima média nos locais de trabalho de 5000 ppm, (8h diárias de exposição, numa semana de trabalho de 40 h), [14].

Como características negativas identifica-se o seguinte conjunto:

- pode ser adsorvido pelos materiais de revestimento do compartimento em estudo, como sejam placas de gesso cartonado ou placas de fibras de madeira (MDF), ainda que em baixa percentagem;
- está presente no ar exterior, pelo que esta concentração tem de ser tomada em conta no processo de detecção e na resolução da equação de balanço mássico;
- é produzido pelos ocupantes da zona em estudo.

O facto de o CO₂ ser um produto resultante do metabolismo dos utentes é no entanto um dos motivos deste gás ser amplamente usado com gás traçador na avaliação da ventilação de espaços como escritórios, habitações, hospitais ou escolas, caracterizados por períodos de permanência prolongada dos ocupantes. No quadro 4.1 constam os valores relativos às taxas de dióxido de carbono produzidas pelas pessoas em função do tipo de actividade correspondente.

Quadro 4.1 – “Poluição” causada pelos ocupantes humanos [14], [27]

Actividade	Metabolismo [W]	Dióxido de carbono [l.s⁻¹]	Vapor de água [g.h⁻¹]
Repouso	100	0,004	40
Trabalho leve	160 a 320	0,0064 a 0,0128	50
Trabalho moderado	320 a 480	0,0128 a 0,0192	50
Trabalho pesado	480 a 650	0,0192 a 0,0260	50
Trabalho muito pesado	650 a 800	0,0260 a 0,0320	50

Apesar de a taxa de produção de CO₂ poder ser facilmente estimada em função da actividade a decorrer, a maior dificuldade relacionada com a utilização destes valores deve-se ao facto de a presença/ausência de todos os ocupantes do espaço em estudo não ocorrer normalmente de forma simultânea.

A utilização como gás traçador do CO₂ produzido pelos ocupantes está sujeita ao cumprimento de um conjunto específico de condições (E741 da ASTM, [25]), relacionadas com:

- localização dos equipamentos de medida;
- duração e frequência dos testes;
- uniformização da concentração do gás traçador;
- métodos de cálculo.

4.4 Técnicas de medição usadas no método do gás traçador

Pretende-se seguidamente analisar as técnicas de medição que são usadas nas medições realizadas no presente trabalho, nomeadamente a técnica do decaimento, a técnica da emissão constante e a técnica do estado estacionário. Abordar-se-á também a técnica de emissão constante com recolha passiva, PFT (“Perfluorcarbon tracer”), devido à cada vez maior atenção que esta técnica merece dos investigadores.

4.4.1 Técnica do decaimento

Nesta técnica uma determinada quantidade de gás traçador é libertada no espaço a ser estudado de modo a obter-se uma concentração inicial uniforme. A partir desse instante, o decaimento da concentração do gás é medido ao longo do tempo e a taxa de renovação horária é determinada com base nos valores registados. Trata-se de uma técnica transiente, obtendo-se grandes variações da concentração do gás traçador no tempo.

Para uma zona em que se supõe que o regime é permanente, em que não há produção nem absorção do gás traçador e em que a concentração deste gás no exterior é nula, a equação de balanço de massa é traduzida em caudais volúmicos pela seguinte expressão matemática:

$$V \frac{dc(t)}{dt} + Q \cdot c(t) = 0 \quad (4.2)$$

com:

- V : volume efectivo do espaço [m³]

- Q : caudal de ventilação [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
- $c(t)$: concentração volúmica do gás [-]
- t : tempo [s]

A solução desta equação diferencial em ordem ao tempo é obtida por:

$$c(t) = C_1 \cdot e^{\left(-\frac{Q}{V}t\right)} \quad (4.3)$$

Quando $t = 0 \Rightarrow c(0) = C_1$ o que significa que C_1 corresponde à concentração do gás traçador no instante inicial, c_0 .

$$c(t) = c_0 \cdot e^{\left(-\frac{Q}{V}t\right)} \quad (4.4)$$

Se a concentração do gás traçador no ar exterior não for nula, como é o caso do dióxido de carbono, que está presente no ar ambiente com uma concentração entre 300 e 500 ppm, [5], [24], a solução da equação diferencial 4.2 é dada pela equação:

$$c(t) = c_{ext} - c_{ext} \cdot e^{\left(-\frac{Q}{V}t\right)} + c_0 \cdot e^{\left(-\frac{Q}{V}t\right)} \quad (4.5)$$

com:

- c_{ext} : concentração volúmica do gás traçador no exterior [-]

A equação 4.5 pode ser reescrita:

$$c(t) - c_{ext} = (c_0 - c_{ext}) \cdot e^{\left(-\frac{Q}{V}t\right)} \quad (4.6)$$

ou de modo equivalente:

$$\ln\left(\frac{c(t) - c_{ext}}{c_0 - c_{ext}}\right) = -\frac{Q}{V} \cdot t \quad (4.7)$$

Representando o número de renovações horárias por R_{ph} [h^{-1}], obtém-se:

$$R_{ph} = \frac{Q}{V} = -\frac{\ln\left(\frac{c(t) - c_{ext}}{c_0 - c_{ext}}\right)}{t} \quad (4.8)$$

com:

- Q : caudal de ventilação [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]
- t : tempo [h]

Representando graficamente em função do tempo os valores do logaritmo natural da diferença entre a concentração do gás traçador e a sua concentração no exterior, o módulo do declive da recta corresponde à renovação horária no intervalo de tempo considerado para as medições (figura 4.1).

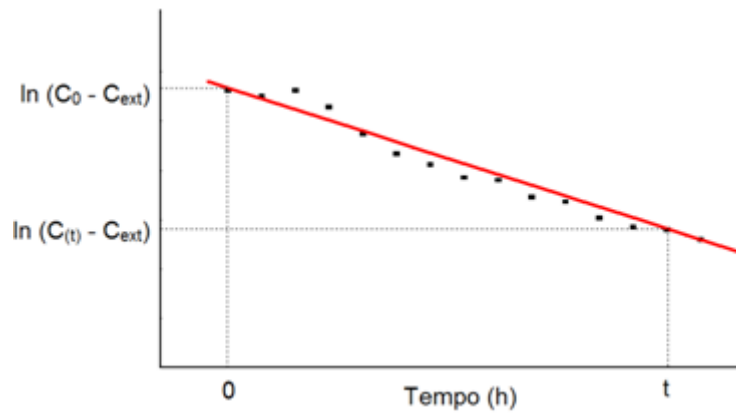


Figura 4.1 – Exemplo ilustrativo de função logarítmica aplicada ao decaimento

A determinação do módulo do declive pode ser obtida por dois métodos:

- pelo cálculo da média dos módulos dos declives entre medições consecutivas durante o intervalo de tempo de medição, aplicando a expressão:

$$\frac{\sum_{i=0}^{n-1} \left[\frac{\ln(c(t_i) - c_{ext}) - \ln(c(t_{i+1}) - c_{ext})}{t_{i+1} - t_i} \right]}{n-1} \quad (4.9)$$

em que n corresponde ao número de medições;

- a partir da equação da recta de regressão linear, resultante do método dos mínimos quadrados aplicado aos valores experimentais obtidos.

Na técnica do decaimento a medição da concentração do gás traçador ao longo do tempo é feita a partir do instante em que foi atingida uma concentração uniforme do gás e a sua produção cessa. Nesta técnica é assumido que o regime é permanente, nomeadamente a temperatura interior e exterior são uniformes e não variam ao longo do tempo e que o vento é estacionário durante o período de medições. Na prática não é certo que assim aconteça. Segundo a norma E 741 da ASTM, [25], para diminuir a incerteza associada ao método, o intervalo entre duas medições sucessivas deve ser de 2 minutos e prolongar-se por um

intervalo de tempo idêntico à “constante de tempo nominal”. A “constante de tempo nominal”, τ_n , é definida como o inverso da taxa de renovação horária.

$$\tau_n = \frac{1}{R_{ph}} \quad [\text{h}] \quad (4.10)$$

Quando o gás traçador usado na técnica do decaimento é o dióxido de carbono produzido pelo metabolismo dos ocupantes, as medições da concentração em função do tempo iniciam-se no instante de saída dos ocupantes do espaço em estudo. Uma situação crítica descrita em [28] ocorre quando a saída dos vários ocupantes do espaço em estudo não se faz em simultâneo, demorando um certo tempo até todos abandonarem o local; verifica-se, nestas condições, um decaimento da concentração do CO₂ inferior aquele que se verificaria na hipótese de todos os ocupantes abandonarem o espaço ao mesmo tempo.

A técnica do decaimento permite obter directamente o valor de R_{ph} a partir dos valores das concentrações interior e exterior. No entanto, a determinação do caudal de ventilação, Q , vai depender do volume efectivo calculado para a zona ventilada, o que aumenta a incerteza associada ao método [24].

4.4.2 Técnica da emissão constante

O gás traçador é introduzido no compartimento em estudo a uma taxa constante, sendo medida e registada a variação da concentração ao longo do tempo. Trata-se igualmente de uma técnica transiente, mas ao contrário da técnica do decaimento, a concentração do gás traçador vai aumentando ao longo do tempo. A curva de crescimento obtida é tanto mais acentuada quanto maior for a taxa de produção do gás traçador por unidade de volume do espaço e quanto menor for a taxa de renovação, R_{ph} .

Admitindo que se verificam todos os pressupostos indicados para o método do gás traçador, na técnica da emissão constante, a concentração do gás, libertado no compartimento em estudo a uma taxa constante e conhecida, vai aumentando ao longo do tempo até atingir uma concentração aproximadamente constante.

A solução da equação diferencial correspondente à emissão constante do gás traçador é:

$$c(t) = \frac{q}{Q} - \left(\frac{q}{Q} \right) e^{\left(-\frac{Q}{V}t \right)} \quad (4.11)$$

com:

- $c(t)$: concentração volúmica do gás [-]
- q : caudal volúmico de emissão do gás traçador [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

- Q : caudal de ventilação [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
- V : volume efectivo do espaço [m^3]
- t : tempo [s]

Considerando que o gás traçador é o dióxido de carbono produzido pelo metabolismo dos ocupantes do espaço em estudo, a equação anterior pode ser reescrita na forma, [29]:

$$c(t) = c_{ext} + \frac{q_{CO_2} \times 10^6}{Q} - \left(c_{ext} - c_0 + \frac{q_{CO_2} \times 10^6}{Q} \right) e^{\left(-\frac{Q}{V}t\right)} \quad (4.12)$$

com:

- $c(t)$: concentração volúmica interior de CO_2 no instante t (ppm)
- c_{ext} : concentração volúmica de CO_2 no exterior (ppm)
- c_0 : concentração interior de CO_2 no instante inicial (ppm)
- q_{CO_2} : caudal volúmico de emissão de CO_2 [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
- Q : caudal de ventilação [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
- V : volume efectivo do espaço [m^3]
- t : tempo [s]

Sendo $Q \times 3600 = R_{ph} \times V$

a equação 4.12 fica:

$$c(t) = c_{ext} + \frac{q_{CO_2} \times 10^6 \times 3600}{R_{ph} \times V} - \left(c_{ext} - c_0 + \frac{q_{CO_2} \times 10^6 \times 3600}{R_{ph} \times V} \right) e^{(-R_{ph}t)} \quad (4.13)$$

com o tempo t expresso em horas.

4.4.3 Técnica do estado estacionário

Esta técnica, também designada por técnica do equilíbrio, corresponde ao prolongamento da técnica de emissão constante. A libertação do gás traçador no espaço é mantida a uma taxa constante no tempo, acabando, após um intervalo de tempo mais ou menos longo, por ser atingida uma concentração aproximadamente constante. O período de medições decorre após a obtenção do estado estacionário.

Como se pode observar na figura 4.2, que apresenta a variação da concentração volúmica interior de CO₂ distintos valores de R_{ph} (equação 4.13), se a produção do gás traçador for mantida a uma taxa constante durante tempo suficiente, é atingido um estado estacionário (ou de equilíbrio dinâmico) em que a concentração do gás traçador varia muito pouco ao longo do tempo. No traçado destas curvas foi considerada uma concentração exterior de dióxido de carbono de 425 ppm, um caudal volúmico de emissão constante de 4,0x10⁻⁶ m³.s⁻¹ e um volume efectivo de 42 m³.

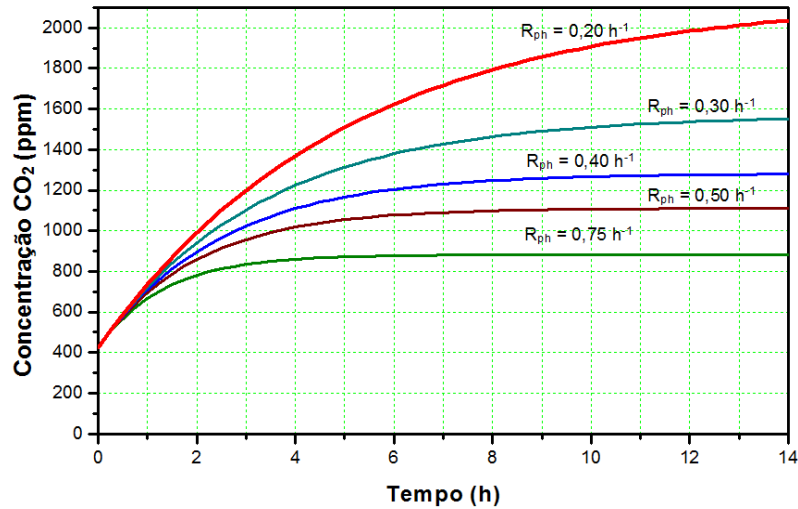


Figura 4.2 – Variação da concentração de CO₂ para distintos valores de R_{ph}

Como se pode observar, considerando constantes os valores de c_{ext} , c_0 , q_{CO_2} e V , a variação da concentração de CO₂ ao longo do tempo depende apenas do valor de R_{ph}. Nestas condições, se a concentração interior de CO₂ for inicialmente igual à concentração exterior, para um dado valor de R_{ph}, o tempo necessário para que a diferença entre as concentrações interior e exterior atinja 95% do valor de equilíbrio é o triplo da constante de tempo nominal, τ_n , [24]. Para uma renovação horária de 0,2 h⁻¹, por exemplo, demorará 15 horas de ocupação permanente para que a diferença de concentrações de CO₂ atinja 95% do valor de equilíbrio. Esta renovação horária corresponde a um caudal de ventilação de cerca de 2,5 l.s⁻¹ por pessoa com uma ocupação de uma única pessoa num compartimento de 15 m² de área. Se o valor de R_{ph} for 0,5 h⁻¹, demorará 6 horas para que a diferença de concentrações de CO₂ atinja 95% do valor de equilíbrio.

Atingido o estado estacionário (teoricamente para $t = \infty$) a equação 4.13 fica reduzida a:

$$\bar{c}_{eq} = c_{ext} + \frac{q_{CO_2} \times 10^6}{R_{ph} \times V} \times 3600 \quad (4.14)$$

com:

- \bar{c}_{eq} : média temporal da concentração do CO₂ no estado estacionário (ppm)
- c_{ext} : concentração volúmica de CO₂ no exterior (ppm)
- q_{CO_2} : caudal volúmico de emissão de CO₂ [m³.s⁻¹]
- R_{ph} : taxa de renovação horária [h⁻¹]
- V : volume efectivo do espaço [m³]

O valor de R_{ph} obtém-se da equação seguinte:

$$R_{ph} = \frac{q_{CO_2} \times 10^6 \times 3600}{(\bar{c}_{eq} - c_{ext}) \times V} \quad (4.15)$$

De acordo com a norma E741 da ASTM, [25], o procedimento aconselhado para a obtenção da concentração média do gás traçador no equilíbrio corresponde a:

- registar no mínimo 5 valores;
- efectuar leituras espaçadas de 5 a 10 minutos.

O valor médio \bar{c}_{eq} obtém-se da equação:

$$\bar{c}_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{n} \quad (4.16)$$

em que n representa o número de registos em instantes diferentes do período estacionário.

Segundo [24], na prática pode considerar-se que existe o estado de equilíbrio quando a alteração verificada durante uma hora na concentração de dióxido de carbono (diferença das concentrações interior e exterior) não ultrapassar o valor dado pela equação:

$$\Delta c_{eq} = \frac{324 \times 10^6 \times q_{CO_2}}{V} \quad (4.17)$$

com:

- Δc_{eq} : variação da concentração do CO₂ [mg.m⁻³]
- q_{CO_2} : caudal volúmico de emissão de CO₂ [m³.s⁻¹]
- V : volume efectivo do espaço [m³]

A equação anterior pode ser modificada para que o valor de Δc_{eq} seja expresso em ppm, tomando então a forma:

$$\Delta c_{eq} = \frac{180 \times 10^6 \times q_{CO_2}}{V} \quad (4.18)$$

com:

- Δc_{eq} : variação da concentração do CO₂ (ppm)
- q_{CO_2} : caudal volúmico de emissão de CO₂ [m³.s⁻¹]
- V : volume efectivo do espaço [m³]

Num compartimento com uma taxa de produção de CO₂ de $4,0 \times 10^{-6}$ m³.s⁻¹ por pessoa e uma densidade de 2 pessoas por 12 m² com um pé direito de 3 metros, da equação 4.18 obtém-se a variação máxima de 40 ppm durante uma hora para se poder considerar atingido o estado de equilíbrio.

4.4.4 Técnica de emissão constante com recolha passiva – PFT

A técnica de emissão do gás traçador tem uma variante de recolha passiva, normalmente designada por método PFT (Perfluorcarbon tracer). O gás traçador normalmente utilizado é o perfluorbenzeno (PB) ou um seu derivado, o perfluormetilobenzeno (PMB), que apresenta várias das características próprias para o efeito, nomeadamente:

- é detectável a concentrações muito baixas;
- é muito pouco adsorvido pelos materiais normalmente existentes nos edifícios;
- não existe praticamente no ar interior;
- não apresenta risco para a saúde dentro dos limites de utilização.

Esta técnica consiste na libertação contínua do gás traçador por cápsulas emissoras, dentro das quais se encontra no estado líquido. A substância traçadora é espalhada no meio ambiente por difusão das suas moléculas pela membrana permeável das cápsulas ou através de tubos capilares, nos quais, numa versão mais recente, tem sido introduzido um fio metálico para mais facilmente controlar a emissão. Tratando-se de uma substância volátil à temperatura ambiente, a taxa de emissão vai depender do valor da temperatura da cápsula, encontrando-se registados valores de 1 a 2×10^{-5} g.h⁻¹, [8].

De modo a assegurar uma homogeneização completa do ar é preconizado o seguinte procedimento, [8]:

- colocar no mínimo uma cápsula emissora em cada um dos compartimentos com entrada de ar exterior (o número de cápsulas a usar depende do volume da zona);
- a localização das cápsulas deve ser próxima das paredes exteriores (a cerca de 0,5 a 1 metro) e afastada de superfícies frias ou quentes bem como da radiação solar directa, de modo a que a taxa de emissão não seja alterada devido a temperaturas não representativas do ar ambiente.

Durante o mesmo período de tempo em que decorre a emissão do gás traçador procede-se também à sua recolha de forma passiva por cápsulas receptoras. Cada uma destas é constituída por um pequeno tubo de vidro dentro do qual existe um material adsorvente do gás, geralmente carvão activado-poroso. As cápsulas receptoras devem ser colocadas em locais representativos do ar ambiente.

Quando se inicia o intervalo de tempo de recolha do gás, uma das extremidades do tubo de vidro é aberta retirando-lhe a protecção de borracha ou de silicone. Como se trata de uma recolha passiva, o caudal de difusão do gás traçador através da cápsula é proporcional ao gradiente de concentrações existente entre a abertura do tubo e o material adsorvente.

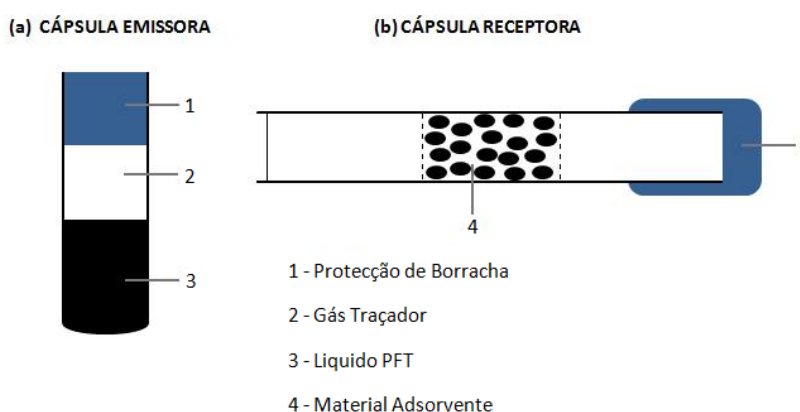


Figura 4.3 – Cápsulas da técnica de PFT (Adaptado de [8])

Concluído o período de ensaios as cápsulas de emissão e de recepção são encerradas e levadas para um laboratório. A análise das cápsulas receptoras é feita por desadsorção da substância recolhida seguida de cromatografia gasosa, a fim de obter o valor da concentração média no intervalo de tempo em que decorreu o ensaio.

Esta técnica, desenvolvida por Dietz et al. em 1983, tem sido muito usada internacionalmente mas a sua utilização em Portugal não está ainda muito difundida tendo em

conta as poucas citações encontradas sobre este método na literatura. Uma referência à sua utilização em Portugal surge no estudo realizado por Freitas *et al.* (2007), [3].

São apresentadas como vantagens o reduzido equipamento necessário para os ensaios no local e o facto de estes poderem prolongar-se no tempo, mesmo em edifícios ocupados. Outra vantagem é o facto de não ser necessário entrar em linha de conta com o volume efectivo do espaço o que reduz a incerteza da técnica. Como desvantagens encontra-se mencionado o facto de obter-se apenas um valor médio da concentração que não permite avaliar a ocorrência de “picos” nas renovações de ar como sejam aberturas de portas ou janelas ou alterações bruscas de infiltrações por mudanças das condições atmosféricas [8].

4.4.5 Limitações das técnicas de medição

Um problema comum à técnica do decaimento e à técnica do estado estacionário (emissão constante) é a dificuldade em verificarem-se na prática todas as hipóteses consideradas.

Na determinação da renovação horária devida à ventilação natural é assumido que existe uma homogeneização completa em toda a zona ventilada. Se no caso dos compartimentos com ventilação natural e pé-direito até 2,5 m esta hipótese pode considerar-se como válida, (em virtude de a homogeneização do ar interior ser na realidade quase completa), no caso de compartimentos com alturas superiores, tal pode não se verificar devido a estratificação da temperatura do ar (e conseqüentemente do gás traçador) [11].

Uma outra condição do método exige que a concentração do gás traçador seja uniforme, de modo a assegurar que a difusão é devida a ar proveniente exclusivamente do exterior. Este pressuposto corresponde ao conceito de espaço de zona única, definido pela norma E741 como espaços onde a concentração do gás traçador é uniforme e em que a troca de ar é feita exclusivamente com o exterior. Se entre os vários compartimentos de um apartamento as portas estiverem abertas, pode admitir-se que existe uma homogeneização completa do ar, sendo o espaço analisado neste caso como um todo. Tratando-se do estudo de um compartimento fechado não é no entanto possível saber de onde provem o ar que dilui o gás traçador (se a partir de infiltrações ou de outras zonas interiores adjacentes), [11].

4.5 A determinação da taxa de produção metabólica do dióxido de carbono

4.5.1 Introdução

A utilização da técnica do estado estacionário implica o conhecimento da taxa de produção de do gás traçador, que no caso do presente trabalho é o CO₂ gerado no metabolismo dos ocupantes. Como é óbvio, quanto mais próximo do valor real da taxa de emissão for o valor utilizado nos cálculos, menor será o erro associado aos resultados. Assim, optou-se por calcular o valor da taxa de produção de CO₂, q_{CO_2} , que corresponde às características reais dos ocupantes dos compartimentos para as condições do estudo, em alternativa à utilização de valores apresentados na literatura. Apresentam-se seguidamente os principais conceitos relacionados com a determinação da taxa de produção metabólica do CO₂.

4.5.2 Taxa de produção de dióxido de carbono no processo respiratório

O consumo de oxigénio e a produção de dióxido de carbono no processo respiratório ocorrem a uma taxa que depende do tamanho da pessoa e da intensidade da sua actividade física. A taxa de consumo de oxigénio de uma pessoa, q_{O_2} , é dada pela equação 4.19, [24]:

$$q_{O_2} = \frac{2,76 \times 10^{-6} \cdot A_D \cdot M}{0,23RQ + 0,77} \quad (4.19)$$

com:

- q_{O_2} : taxa de consumo de oxigénio [m³.s⁻¹]
- A_D : área do corpo segundo DuBois [m²]
- RQ : quociente respiratório ou seja a razão entre as taxas volumétricas de consumo de O₂ e de produção de CO₂ [-]
- M : intensidade de actividade metabólica, em taxa de metabolismo por unidade de área [met]

A área A_D pode ser determinada pela equação:

$$A_D = 0,203 \cdot H^{0,725} \cdot W^{0,425} \quad (4.20)$$

com:

- H : altura da pessoa [m]
- W : massa corporal [kg]

Assim, o valor de A_D para uma pessoa com 1,85 m e a massa de 80 kg, calculado pela equação 4.20 é 2,1 m².

O valor do quociente respiratório, RQ , depende de factores como o regime alimentar, a intensidade da actividade física e as condições de saúde da pessoa e é considerado igual a 0,83 para um adulto de tamanho médio com uma actividade metabólica leve ou sedentária [24].

A taxa de produção de dióxido de carbono de uma pessoa q_{CO_2} está relacionada com o teor de consumo de oxigénio q_{O_2} pela expressão $q_{CO_2} = q_{O_2} \times RQ$ ou seja:

$$q_{CO_2} = \frac{2,76 \times 10^{-6} \cdot A_D \cdot M \cdot RQ}{0,23RQ + 0,77} \quad (4.21)$$

De acordo com a equação 4.21, no cálculo da taxa de produção de CO₂ dos ocupantes de um espaço deve ter-se em consideração o nível de actividade metabólica de cada um deles bem como o seu tamanho.

No quadro 4.2 apresentam-se alguns valores da intensidade de actividade física em função do tipo de actividade.

Quadro 4.2 – Actividade metabólica correspondente a várias acções (Adaptado de [21] e [30])

Actividade	Intensidade da actividade metabólica [met]
Repouso (dormir)	0,8
Repouso (sentado)	1,0
Escrever	1,2
Andar (2 km/h)	1,9
Andar (3 km/h)	2,4
Limpeza doméstica	2,0 - 3,4
Cozinhar	1,6 – 2,0
Dançar	2,4 - 4,4
Exercício físico	3,0 - 4,0

Na figura 4.4 representam-se as taxas de consumo de oxigénio e de produção de dióxido de carbono em função da actividade metabólica, para um adulto de tamanho médio com uma área de 1,8 m² e $RQ = 0,83$.

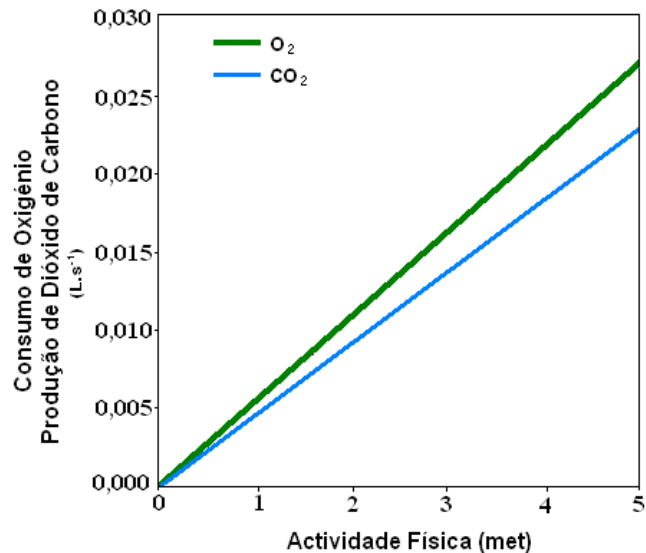


Figura 4.4 – Consumo de oxigênio e produção de dióxido de carbono em função da actividade física (Adaptado de [24])

4.6 O princípio de detecção do gás traçador

4.6.1 Introdução

Um dos principais métodos usados comercialmente para a detecção do dióxido de carbono baseia-se na capacidade de absorção de radiação infravermelha desta substância. Uma determinada espécie química absorve radiações de comprimentos de onda bem definidos do espectro electromagnético e na maior parte dos casos substâncias diferentes absorvem radiações em diferentes zonas do espectro. Uma grande variedade de gases absorve radiação na gama de comprimentos de onda do infravermelho (0,7 a 300 μm) devido ao facto dos valores de energia associada a estas radiações electromagnéticas corresponderem às energias de excitação do modo vibracional e do modo rotacional das moléculas desses gases. Para uma dada espécie química, a absorptância da radiação varia com o comprimento de onda dentro da sua gama de radiações de absorção, como se pode observar na figura 4.5, que mostra a variação da absorptância de alguns gases em função do comprimento de onda.

Como se pode observar na figura 4.5, o dióxido de carbono apresenta o valor máximo de absorptância para o comprimento de onda de 4,26 μm , [31].

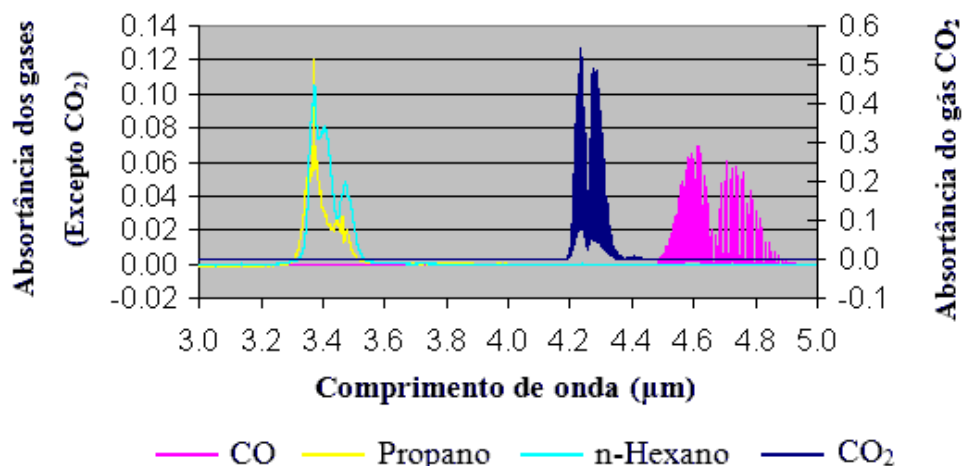


Figura 4.5 – Variação da absorvância de alguns gases em função do comprimento de onda [32]

4.6.2 Método de detecção por espectroscopia não-dispersiva de infravermelho, NDIR

Nas medições efectuadas ao longo deste trabalho, a concentração de dióxido de carbono no interior dos quartos foi medida pelo método de detecção por espectroscopia não-dispersiva de infravermelho, NDIR, utilizando um sensor de absorção de infravermelhos de feixe duplo ligado a um “data-logger” que armazena as leituras.

Como se pode observar na figura 4.6, o módulo de análise NDIR de feixe duplo é constituído por um par de emissores e um par de detectores. A radiação infravermelha, IV, emitida pelas duas fontes emissoras dirigidas para a câmara de detecção, passa através de duas células colocadas entre os emissores e os detectores. A célula de referência contém um gás inerte, ou seja, que não absorve radiações com comprimentos de onda do infravermelho. Na célula de análise passa a amostra de ar de que se pretende medir a concentração do gás traçador. Parte da radiação IV que atravessa esta célula é absorvida pelas moléculas do gás traçador, sendo a absorção proporcional à concentração de gás na amostra.

Na câmara de detecção, a diferença de radiação IV proveniente das duas células é convertida numa alteração da resistência eléctrica, que por sua vez é traduzida num valor de concentração.

Os sensores devem ser colocados de modo a assegurar que as leituras não são afectadas pela produção de CO₂ dos ocupantes nem por lugares de ventilação muito baixa. Os locais de detecção devem ser seleccionados realizando medições em vários sítios do espaço e identificando os que conduzem a um valor de concentração representativo.

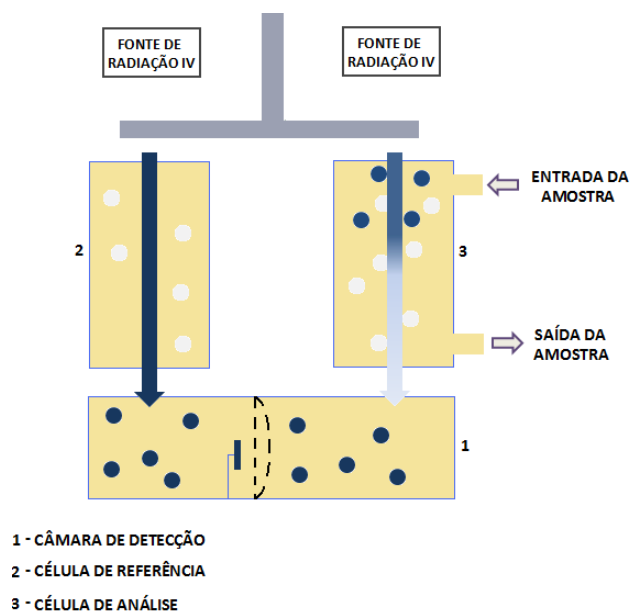


Figura 4.6 – Detecção de CO₂ por espectroscopia não-dispersiva de infravermelho (Adaptado de [31])

Devido ao facto de a concentração de dióxido de carbono no ar exalado pelas pessoas ser muito elevada (cerca de 400000 ppm), as medições não devem ser efectuadas próximas dos ocupantes (uma distância de cerca de 2 metros é normalmente suficiente para evitar estes efeitos). Também devem ser evitados os locais muito próximos das entradas de ar exterior em que a concentração de dióxido de carbono é muito mais baixa, [24].

Capítulo 5

Metodologia

5.1 Introdução

Tendo no capítulo anterior exposto os fundamentos teóricos do método do gás traçador e feito a revisão da literatura sobre a descrição das técnicas mais utilizadas neste método, procede-se neste capítulo à apresentação da metodologia abordada no presente estudo.

Como foi referido no capítulo 1, com este trabalho pretende-se avaliar os níveis da qualidade do ar interior de dois quartos de dormir em dois apartamentos de construção recente, localizados no concelho de Lisboa. Na avaliação serão considerados dois parâmetros, a taxa de renovação horária dos compartimentos em estudo e os valores máximos da concentração de dióxido de carbono atingidos durante a noite. A determinação experimental da taxa de renovação horária baseia-se no método do gás traçador, utilizando o dióxido de carbono produzido pelos próprios ocupantes.

Para a consecução dos objectivos traçados procedeu-se em cada um dos dois compartimentos à monitorização contínua do teor de dióxido de carbono interior e das temperaturas e humidades relativas exterior e interior durante 45 dias. Foi colocado em cada um dos compartimentos um detector de CO₂ por absorção não-dispersiva de infravermelhos conectado a um “data logger” que efectuou registos de temperatura, humidade relativa interior e taxa de concentração de CO₂. Para fazer as leituras e registos dos parâmetros exteriores foram utilizados termo-higrómetros.

Na primeira parte deste capítulo é feita uma caracterização dos dois quartos de dormir seleccionados e apresentam-se as plantas dos fogos habitacionais. Seguidamente descreve-se o método de medições incluindo a caracterização dos aparelhos de medida utilizados. Por último, são feitas algumas considerações sobre o modo como decorreu o processo e apresentados graficamente os valores obtidos.

5.2 Caracterização dos apartamentos/quartos de dormir seleccionados

Para a realização deste estudo foram seleccionados dois fogos habitacionais, localizados na cidade de Lisboa:

- o primeiro, de tipologia T3, situa-se na freguesia de Benfica, junto à Igreja, sendo este representativo da construção da década de noventa do século vinte;
- o segundo, de tipologia T4, situa-se em Telheiras, na freguesia do Lumiar, tendo a sua construção sido concluída em 2002.

Para além da década de construção, os factos condicionantes na escolha dos apartamentos, foram:

- serem habitados em permanência;
- os ocupantes dos quartos de dormir apresentarem hábitos diários (rotinas) relativamente bem definidos.
- a existência de uma varanda em que fosse possível colocar o aparelho de medida dos parâmetros exteriores (temperatura e humidade relativa) e permitisse controlar o seu funcionamento;
- terem uma área semelhante;
- disponibilidade dos residentes para colaborar no estudo.

No apartamento de Benfica, o quarto de dormir em estudo, que passará a ser designado por Quarto B, tem uma vertente orientada a Sudoeste e outra a Noroeste (figura 5.1). No apartamento de Telheiras, o quarto de dormir seleccionado, designado como Quarto T, tem as vertentes orientadas a Norte e a Nascente (figura 5.2).

O quarto B é ocupado regularmente por dois jovens adultos do sexo masculino. O quarto T é ocupado por um adulto do sexo masculino. A idade de todos os ocupantes situa-se entre os 20 e os 30 anos.

No Quarto T a abertura da janela para arejamento é efectuada diariamente no período da manhã. No Quarto B a abertura da janela não é efectuada com regularidade.

No quadro 5.1 apresentam-se algumas características dos fogos/quartos estudados e nas figuras 5.1 e 5.2 apresentam-se as plantas correspondentes, com os quartos em estudo delimitados a vermelho.

Quadro 5.1 – Características dos apartamentos

Quarto	Telheiras	Benfica
Área na planta [m ²]	16,5	14,2
Pé-direito [m]	2,7 / 2,4	2,7
Volume [m ³]	44,5	38
Volume efectivo de ventilação [m ³]	42	35
Tipo de aquecimento	Aquecimento central	-----
Tipo de janelas	Deslizante de duas folhas	Batente de duas folhas
Área da janela [m ²]	2,1	2,3
Nº de ocupantes	1	2
Idade dos ocupantes	20 -30 anos	
Género dos ocupantes	Masculino	
N.º de habitantes do apartamento	3/4	3/4
Área total do apartamento [m ²]	190	140

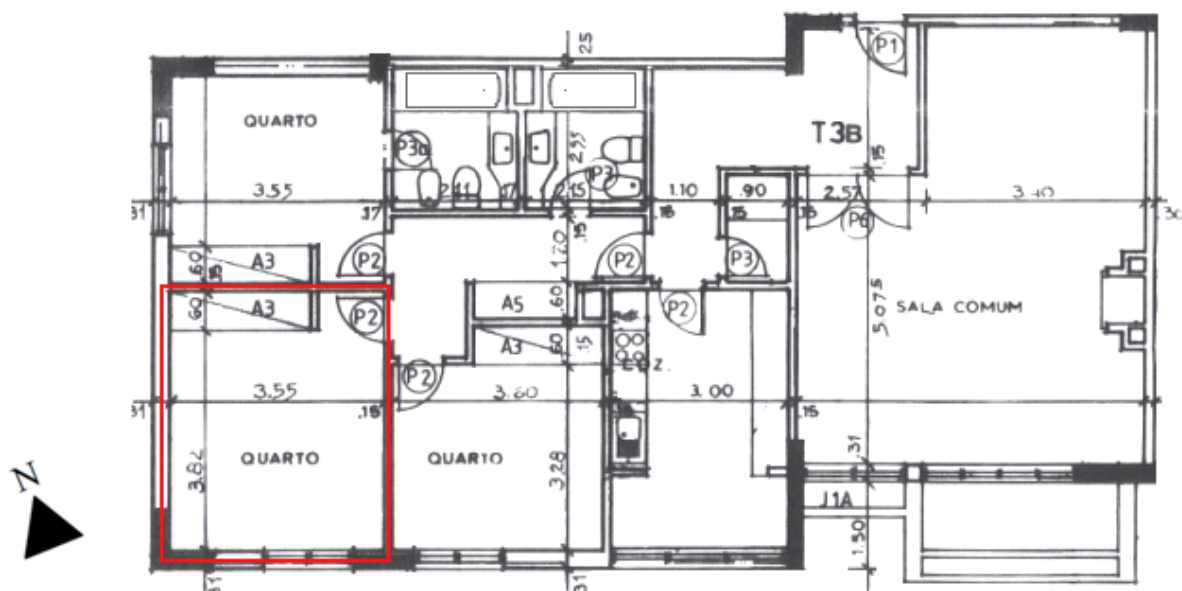


Figura 5.1 – Planta do apartamento B

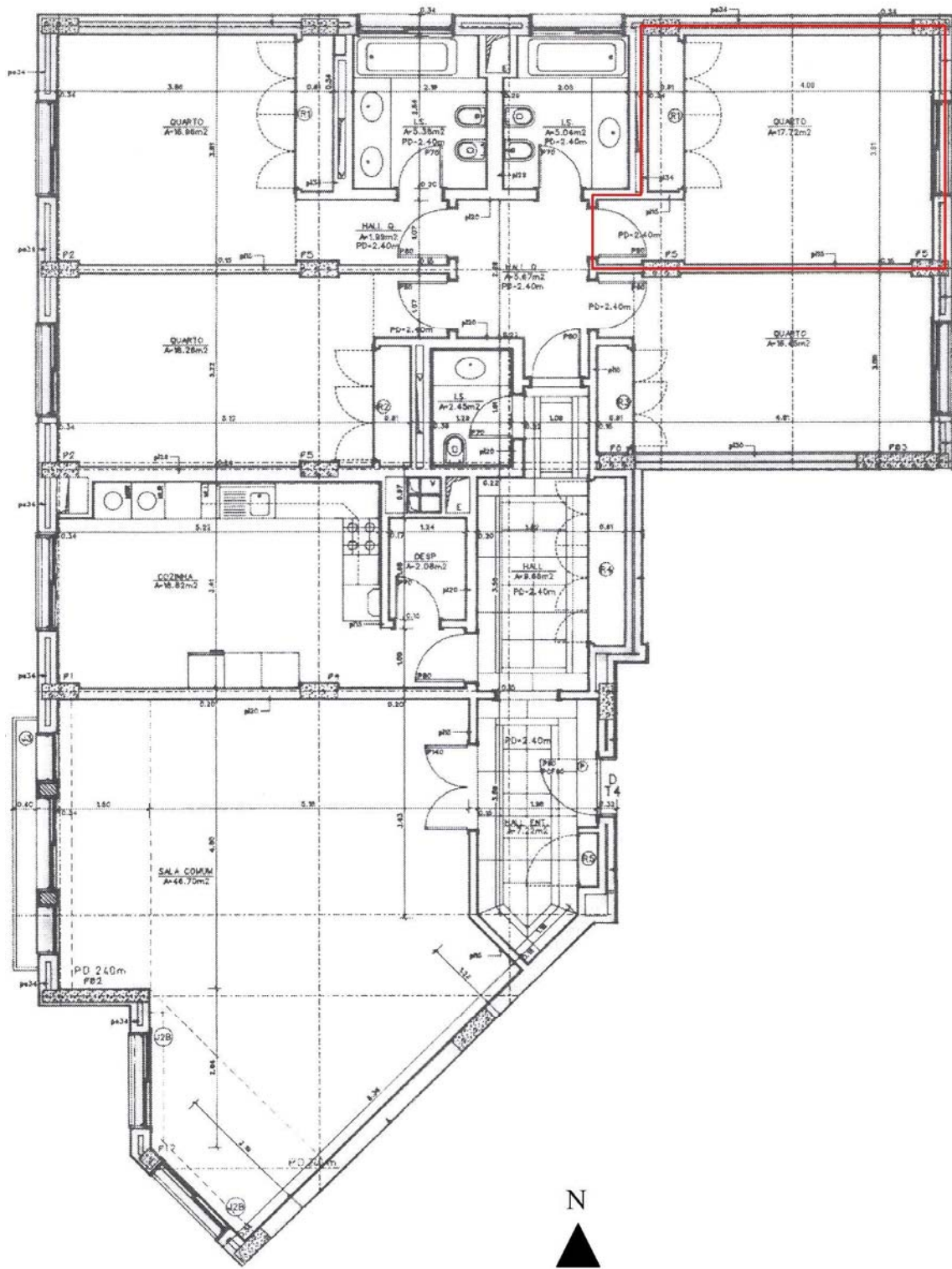


Figura 5.2 – Planta do apartamento T

5.3 Descrição do método de medições

A campanha de medições decorreu ao longo de um período de 45 dias da estação de aquecimento, entre os dias 14 de Fevereiro e 31 de Março de 2008. A campanha de medições foi realizada de modo a não causar alterações significativas na rotina dos moradores, não só por se pretender causar o mínimo incómodo mas também para obter resultados baseados nos hábitos diários dos ocupantes.

Para a medição da temperatura e da humidade relativa do ar exterior foram usados dois termo-higrómetros digitais, modelo HygroLog NT da Rotronic. De modo a ficarem ao abrigo da incidência directa dos raios solares e devidamente protegidos da chuva, os sensores foram colocados numa varanda dentro de uma caixa protectora revestida de material reflector.



Figura 5.3 – Termo-higrómetro digital

Os termo-higrómetros foram programados para efectuarem registos de temperatura e humidade relativa a intervalos de 15 minutos.

A concentração de dióxido de carbono no interior dos quartos foi medida usando um detector por absorção não-dispersiva de infravermelhos, modelo Telaire 7001. As leituras de CO₂ foram registadas por intermédio de um “data logger” (Hobo U12) ligado ao detector, que possui também a função de medir a temperatura e a humidade relativa do ar. O “data logger” foi programado para efectuar registos a cada 15 minutos, em simultâneo com os registos de temperatura e humidade relativa do ar exterior.

O intervalo de medida correspondente ao cabo de ligação entre o detector de CO₂ e o “data logger” era de 0 - 2500 ppm.

Os sensores de CO₂ foram colocados a uma altura de 70 cm e localizados de modo a que os aquecedores existentes e a eventual estagnação do ar não influenciassem os valores das medições, tal como referido em [24] e [29].

Quadro 5.2 – Características de funcionamento do detector de CO₂ - Telaire 7001

Telaire 7001	
Intervalo de Medida	0 - 10000 ppm no “display”
	0 - 4000 ppm ligação externa
Incerteza	± 50 ppm ou ± 5% do valor medido até 5000 ppm
Resolução	± 1 ppm

Quadro 5.3 – Especificações do “data logger” - Hobo U12

Hobo U12		
Intervalo de Medida	Temperatura	-20° até 70° C
	Humidade Relativa	5% até 95%
	Ligação Externa	0 até 2,5 DC volts
Incerteza	Temperatura	± 0,35°C de 0° até 50°C
	Humidade Relativa	± 2,5 % de 10 até 90%
	Ligação Externa	± 2,5% da leitura absoluta
Resolução	Temperatura	0,03°C a 25°C
	Humidade Relativa	0,03%



Figura 5.4 – Detector de CO₂ - Telaire 7001 ligado ao “data logger”



Figura 5.5 – “Data logger” - Hobo U12

Ambos os detectores de concentração de dióxido de carbono tinham, na altura da campanha de medições, a calibração de origem dentro do período de validade que consta nas especificações fornecidas pelo fabricante. Apesar disso foi feita uma aferição dos valores da concentração de CO₂ registados pelos aparelhos, por comparação, *in situ*, com equipamentos

de elevado rigor (multipoint sampler da marca Bruel. & Kjaer); as diferenças entre os valores obtidos, num período de medições de aproximadamente uma hora, não excederam 10 ppm em ambos os aparelhos.

5.4 Resultados das medições

Após a conclusão do período de medições procedeu-se à leitura, análise e tratamento dos valores registados.

A análise dos valores registados para os parâmetros exteriores, temperatura e humidade relativa, permite concluir que as condições de medição não foram devidamente preparadas. A caixa protectora, apesar de revestida por uma folha metálica reflectora, não evitou que os valores de temperatura registados nos períodos do dia em que o sol incidia directamente sobre a varanda onde estavam localizados os aparelhos fossem demasiado elevados, ou seja correspondiam a medições ao sol e não à sombra como se desejava. Por essa razão, optou-se por utilizar, no presente estudo, os registos de temperatura e humidade relativa exteriores recolhidos pela estação meteorológica da Portela, Lisboa, e disponibilizados pelo sítio da empresa WeatherUnderground, [33].

Concluída a recolha de valores procedeu-se à elaboração dos gráficos que incluem os valores dos 5 parâmetros obtidos ao longo dos 45 dias de campanha de medições para cada um dos compartimentos: concentração de dióxido de carbono interior, c_{CO_2} , humidade relativa interior, Hr_{int} , temperatura interior, T_{int} , humidade relativa exterior, Hr_{ext} , e temperatura exterior, T_{ext} .

Com o propósito de tornar mais fácil a leitura e interpretação dos valores obtidos, optou-se por criar um gráfico por cada nove dias de registos, obtendo-se deste modo, cinco gráficos para cada um dos quartos de dormir (figuras 5.6 a 5.15).

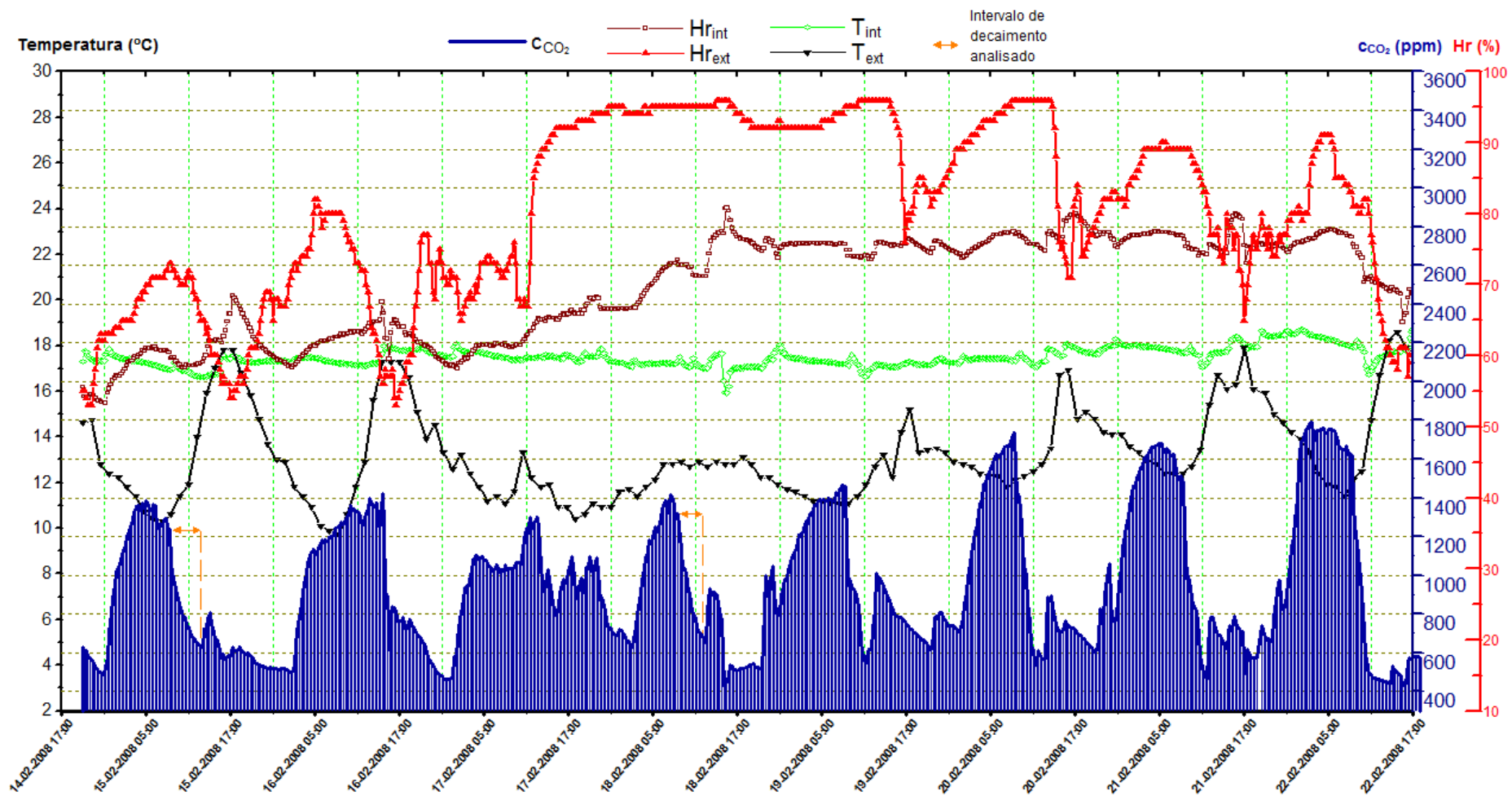


Figura 5.6 – Quarto T - Valores de cCO₂, Hr_{int}, Hr_{ext}, T_{int}, T_{ext} obtidos de 14 a 22 de Fevereiro

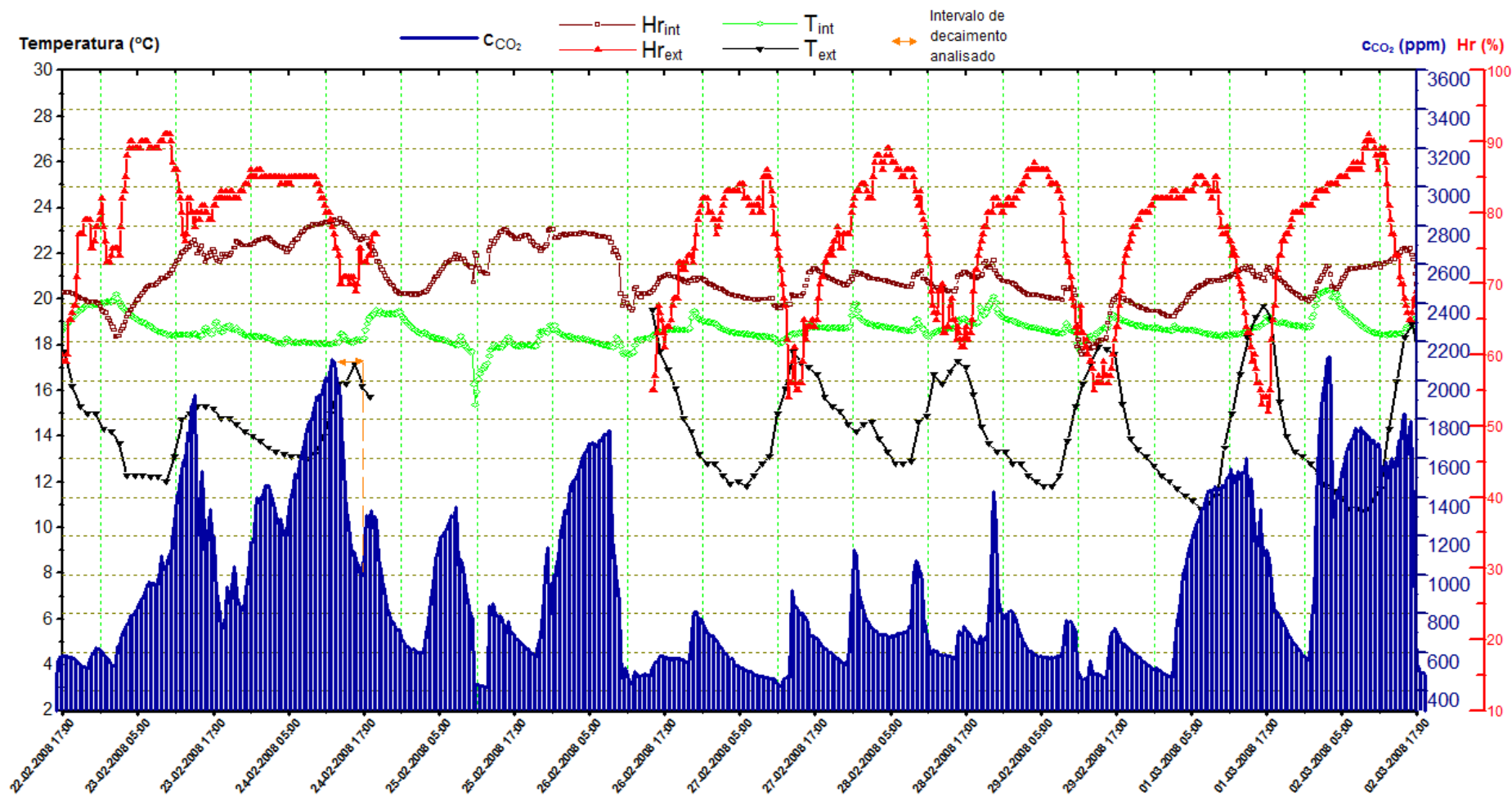


Figura 5.7 – Quarto T - Valores de c_{CO_2} , Hr_{int} , Hr_{ext} , T_{int} , T_{ext} obtidos de 22 de Fevereiro a 2 de Março

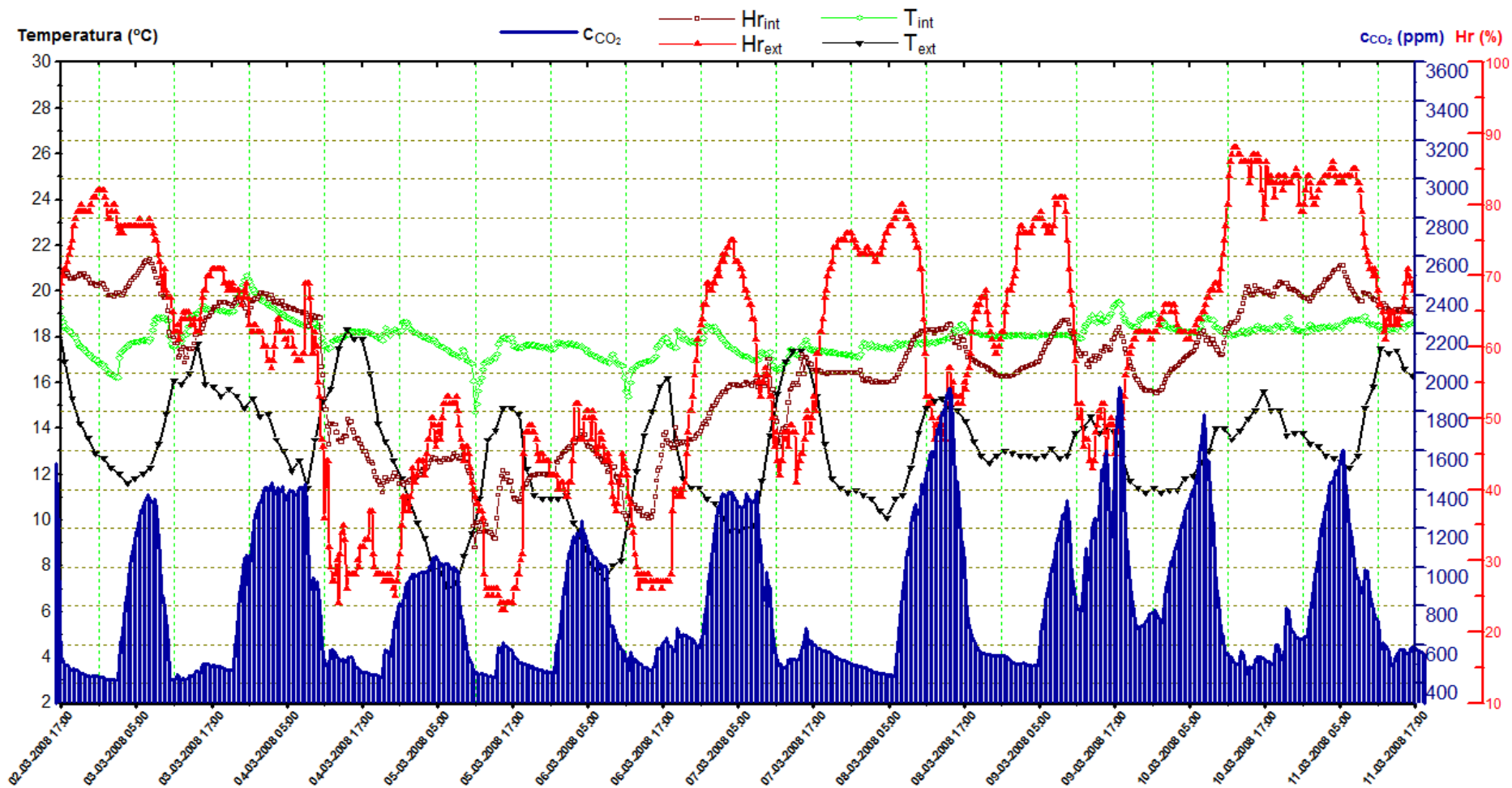


Figura 5.8 – Quarto T - Valores de c_{CO_2} , Hr_{int} , Hr_{ext} , T_{int} , T_{ext} obtidos de 2 a 11 de Março

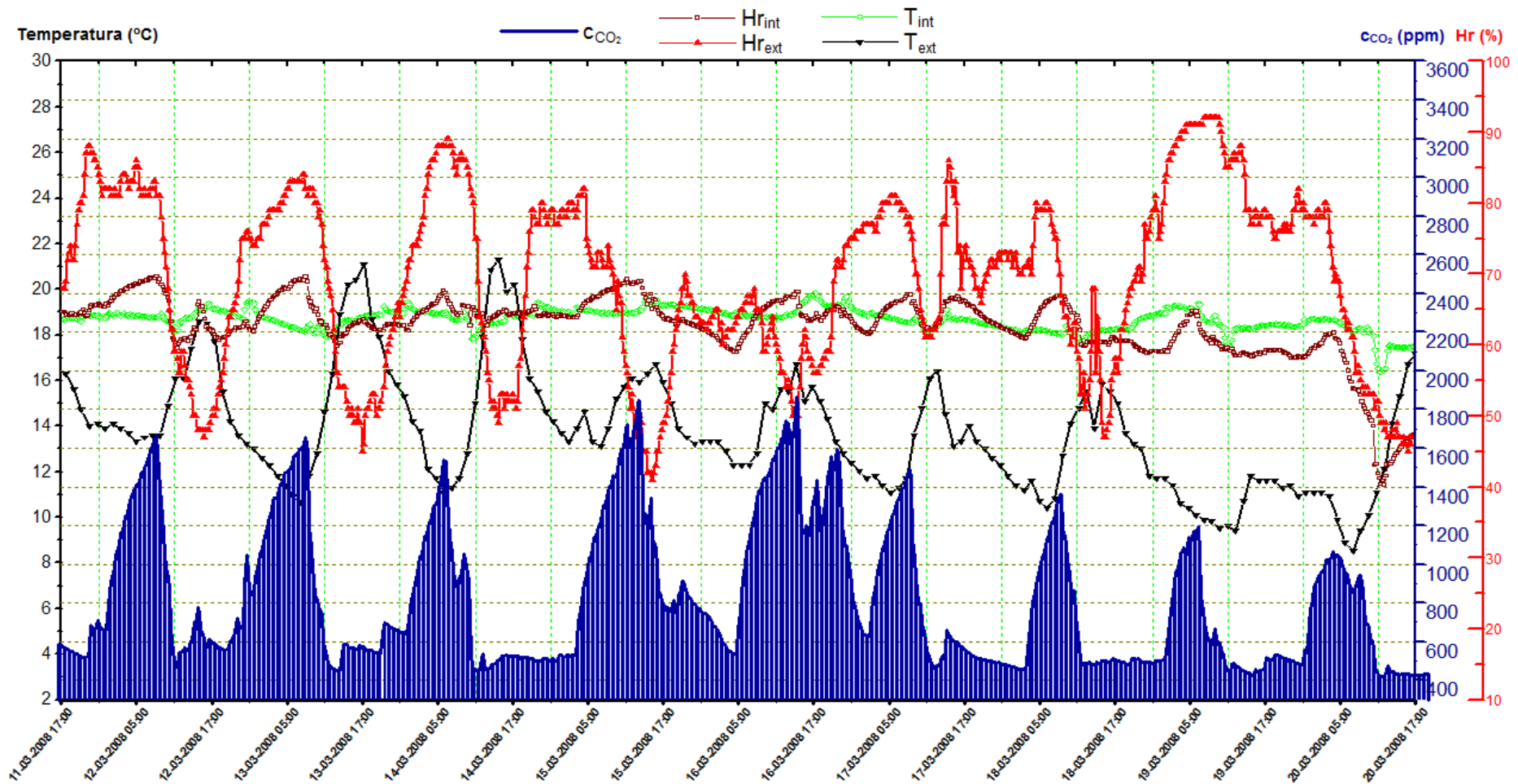


Figura 5.9 – Quarto T - Valores de cCO₂, Hr_{int}, Hr_{ext}, T_{int}, T_{ext} obtidos de 11 a 20 de Março

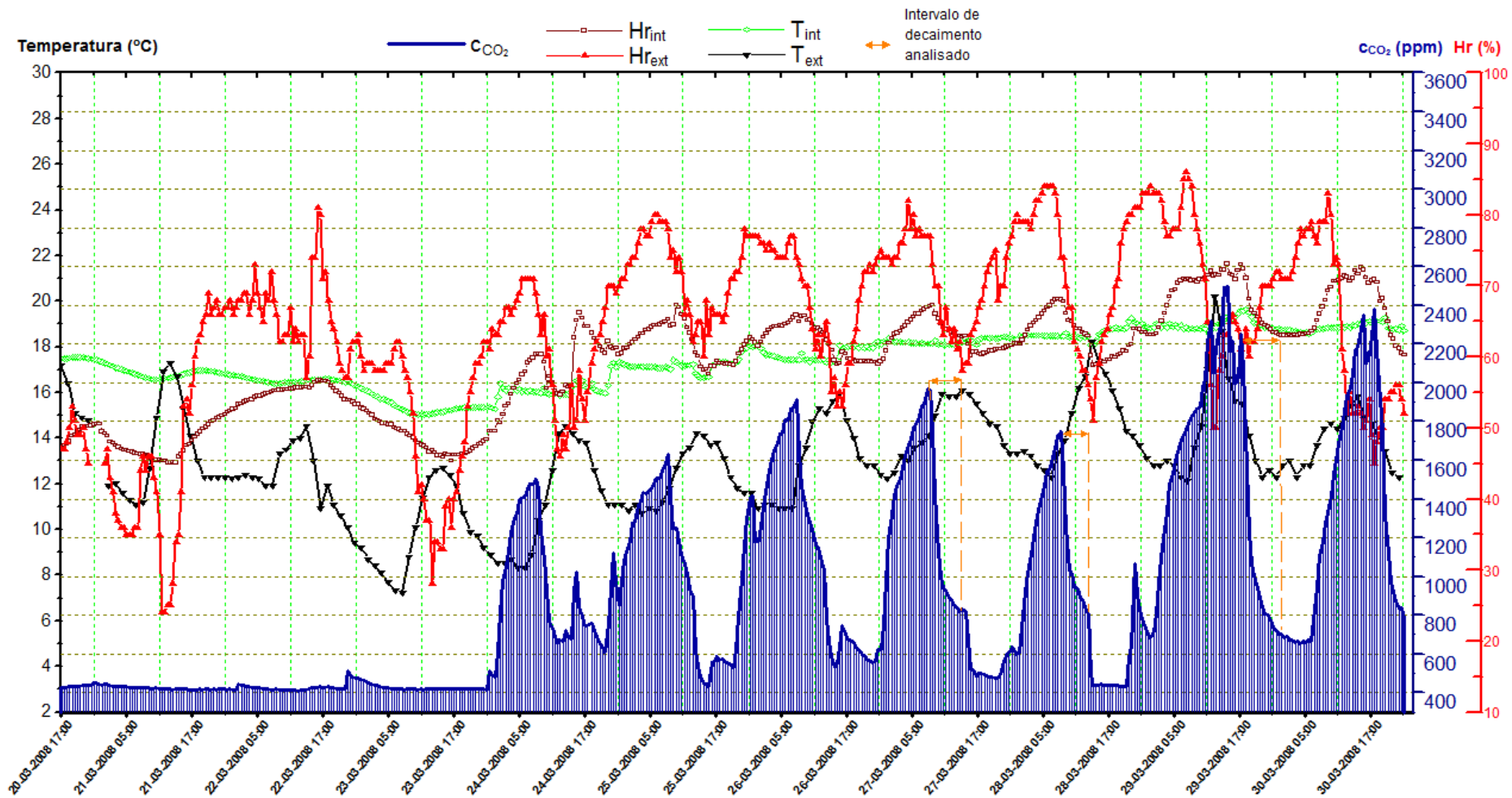


Figura 5.10 – Quarto T - Valores de c_{CO_2} , $H_{r_{int}}$, $H_{r_{ext}}$, T_{int} , T_{ext} obtidos de 20 a 30 de Março

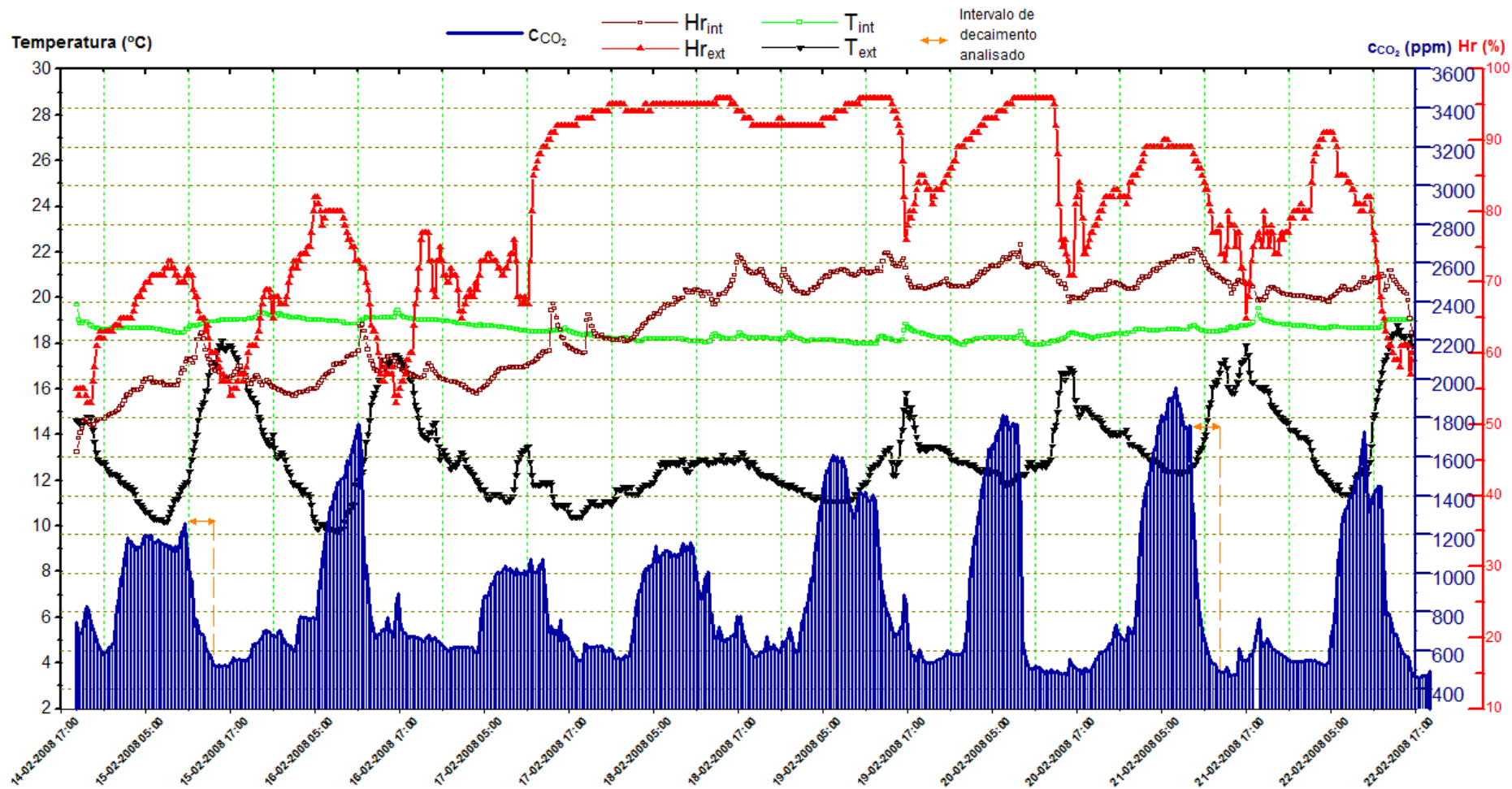


Figura 5.11 – Quarto B - Valores de c_{CO_2} , Hr_{int} , Hr_{ext} , T_{int} , T_{ext} obtidos de 14 a 22 de Fevereiro

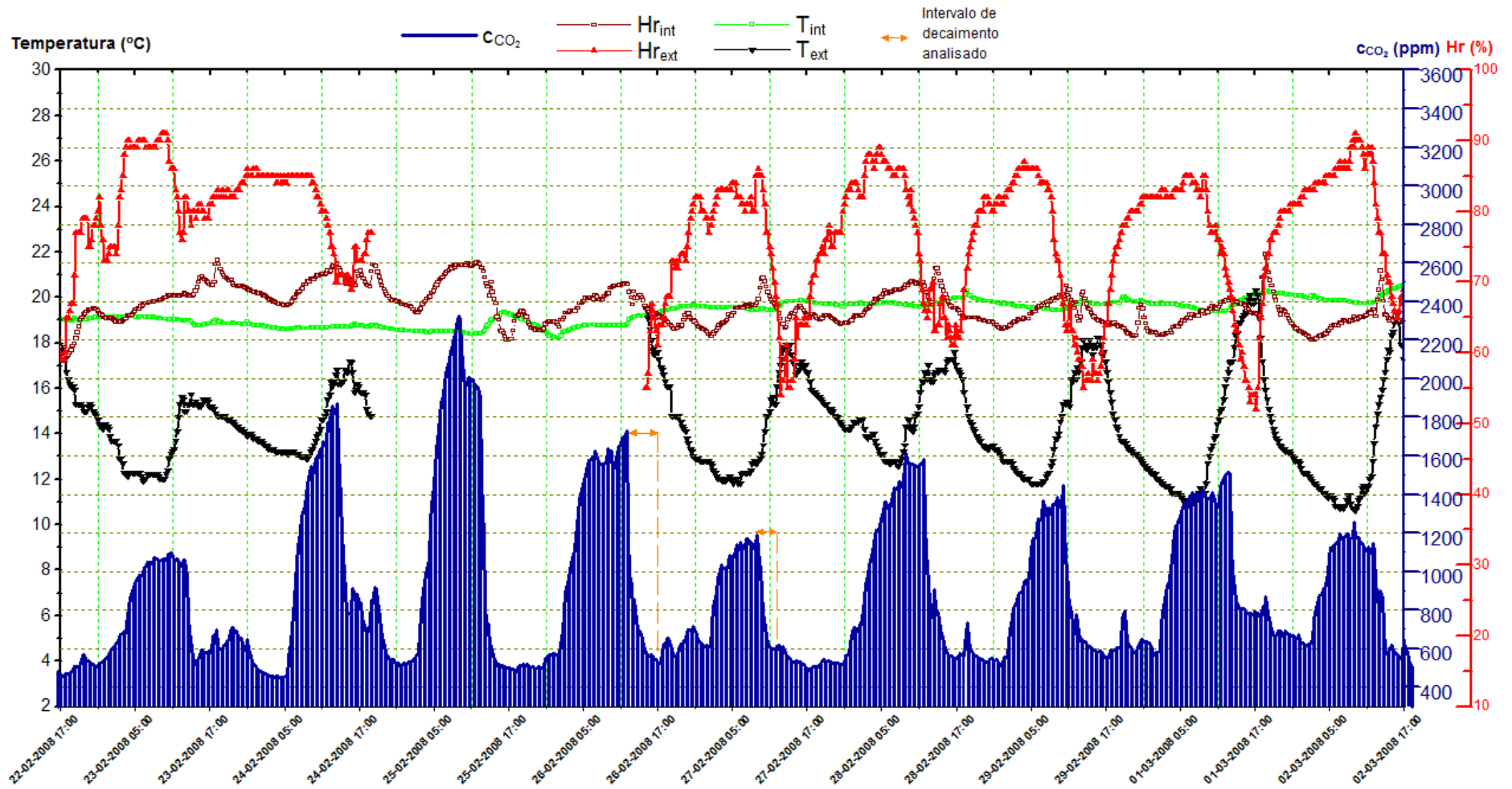


Figura 5.12 – Quarto B - Valores de cCO₂, Hr_{int}, Hr_{ext}, T_{int}, T_{ext} obtidos de 22 de Fevereiro a 2 de Março

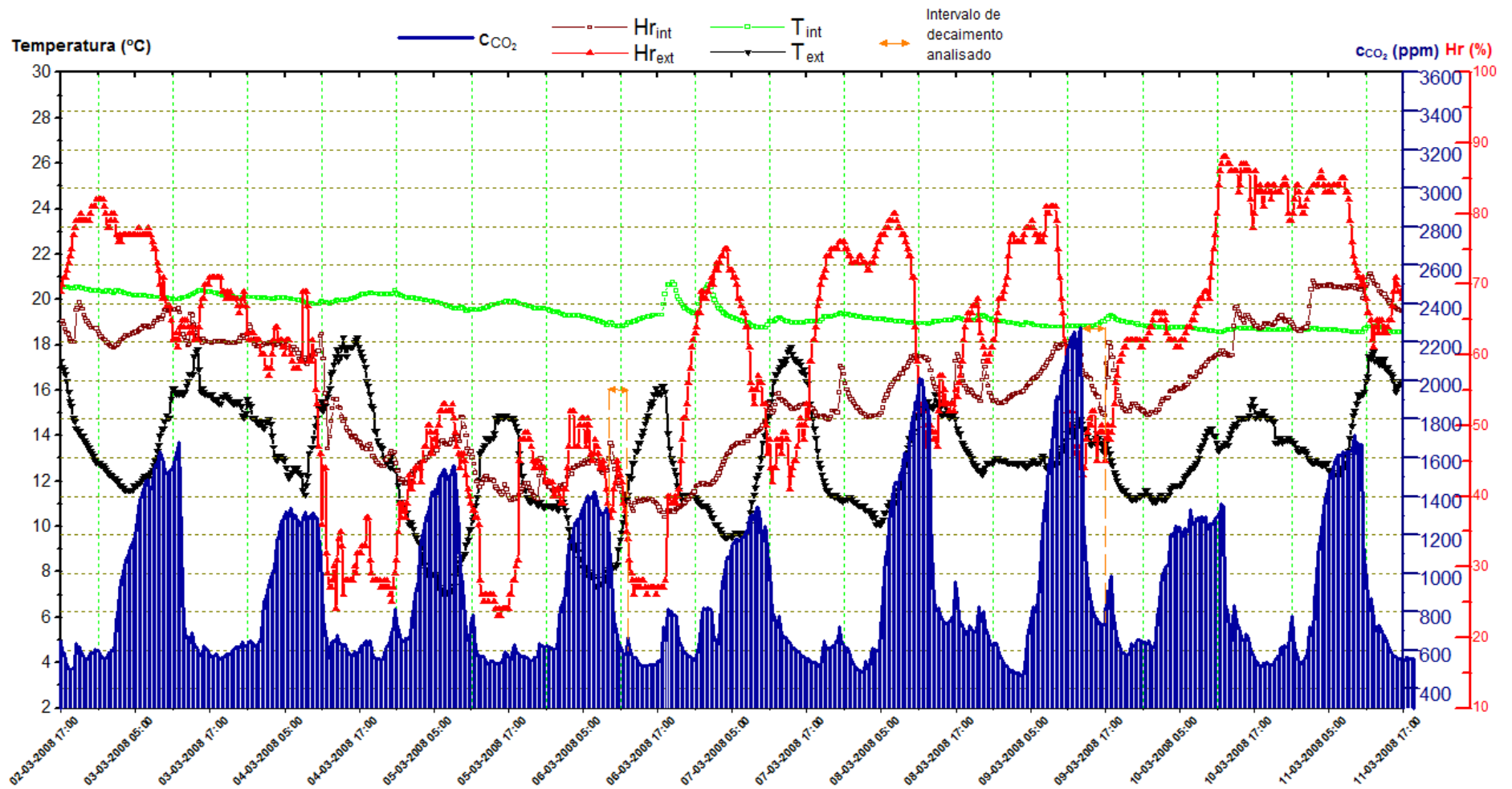


Figura 5.13 – Quarto B - Valores de cCO₂, Hr_{int}, Hr_{ext}, T_{int}, T_{ext} obtidos de 2 a 11 de Março

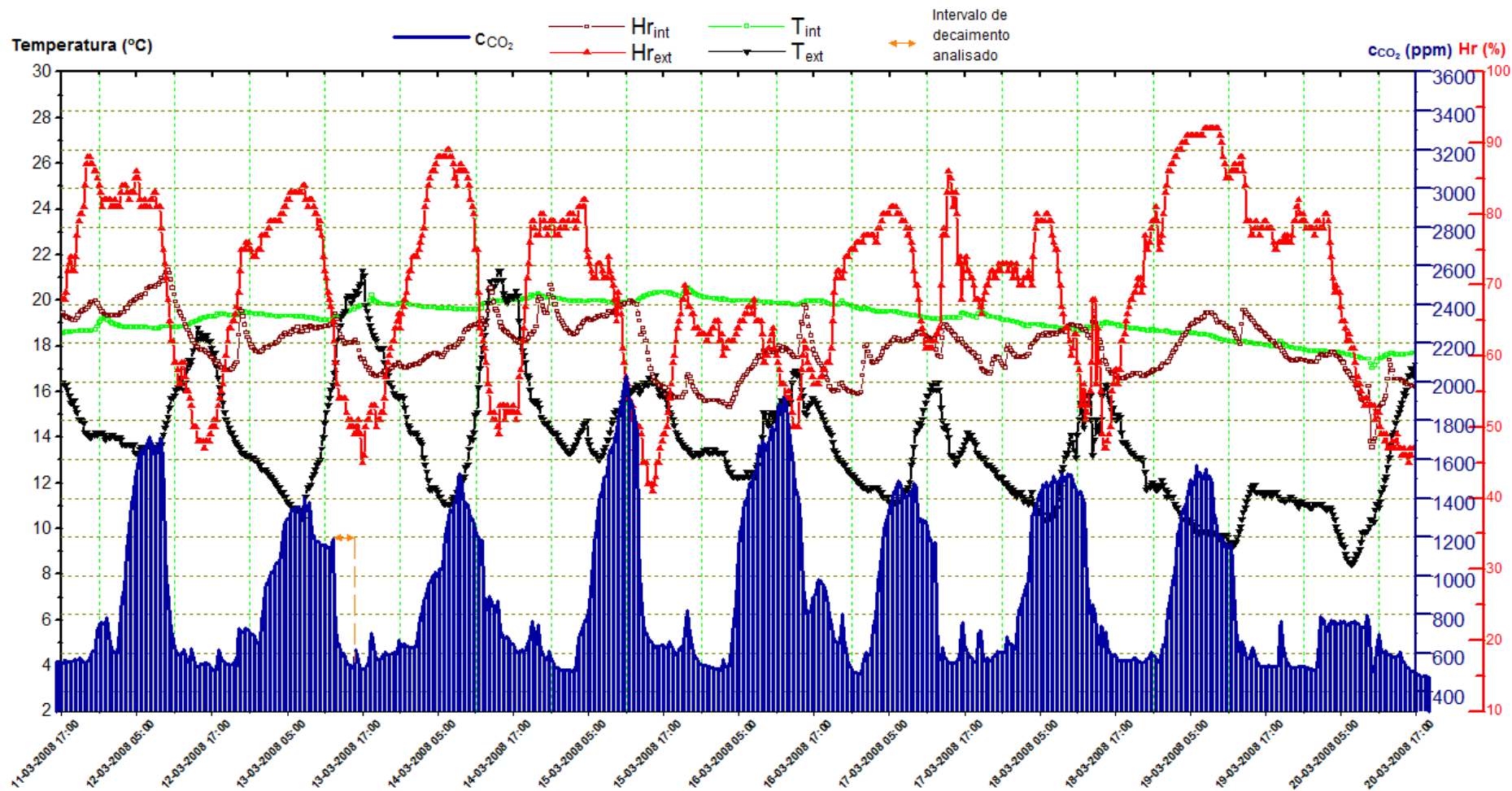


Figura 5.14 – Quarto B - Valores de c_{CO_2} , Hr_{int} , Hr_{ext} , T_{int} , T_{ext} obtidos de 11 a 20 de Março

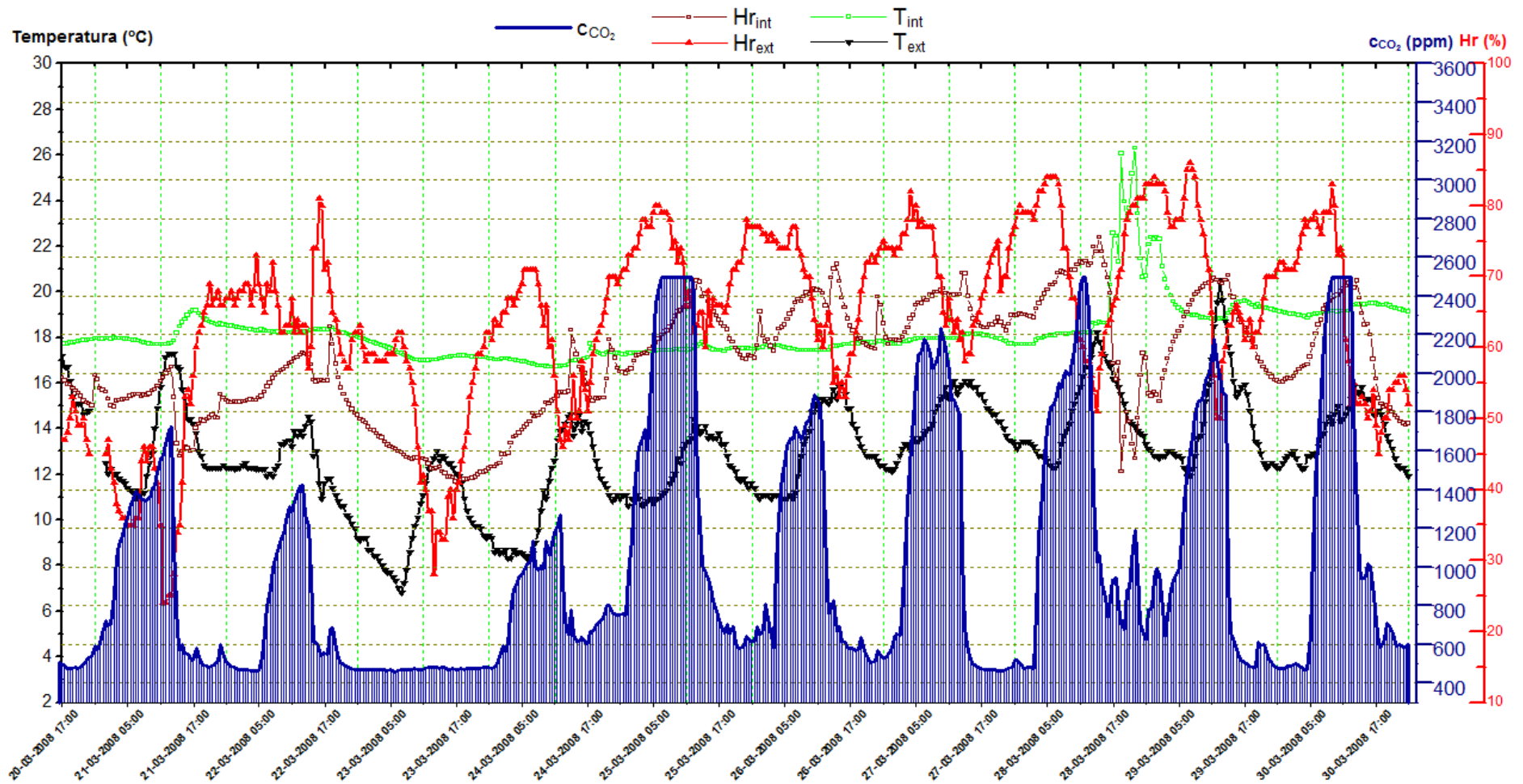


Figura 5.15 – Quarto B - Valores de c_{CO_2} , Hr_{int} , Hr_{ext} , T_{int} , T_{ext} obtidos de 20 a 30 de Março

Capítulo 6

Avaliação dos níveis de qualidade do ar interior

6.1 Introdução

Como foi referido anteriormente, a monitorização contínua da concentração interior de CO₂ de um compartimento, em que os ocupantes são a única fonte de emissão, permite não só determinar a taxa de ventilação do espaço mas também estabelecer um padrão de ocupação do espaço através da análise das variações dos valores de concentração obtidos. É assim possível estimar a frequência das entradas e saídas dos ocupantes, o nível e o tempo de ocupação, detectar valores máximos de concentração ou a ocorrência de outros eventos como a abertura de janelas para arejamento.

Na primeira parte do presente capítulo pretende-se analisar os registos experimentais da concentração de CO₂ no compartimento T e estabelecer uma relação com o padrão diário de ocupação. Seguidamente procede-se à determinação da taxa de renovação horária, R_{ph} , para cada um dos dois compartimentos em estudo, durante intervalos de tempo considerados representativos dos hábitos dos ocupantes. Com este propósito, é aplicado o procedimento do método do gás traçador, descrito no capítulo 4, aos valores da concentração de CO₂ registados ao longo dos 45 dias no quarto T e no quarto B.

Numa primeira fase, a determinação das taxas de ventilação é realizada com recurso à técnica do decaimento, sendo posteriormente aplicada a técnica do estado estacionário. Optou-se pela utilização das duas técnicas com o objectivo de avaliar a que corresponde a uma aplicação experimental mais adequada e com menos limitações nos casos concretos em estudo. É importante salientar que a aplicação destas técnicas no estudo de um compartimento fechado apresenta um inconveniente: a origem desconhecida do ar que dilui o gás traçador (interior ou exterior à habitação). Este facto implica que o valor da taxa de admissão de ar

exterior possa ser inferior ao determinado. Ainda no âmbito da determinação das taxas de renovação horárias, procede-se à comparação entre valores experimentais de concentração de CO₂ e curvas de concentração calculadas com base na técnica da emissão constante, procurando aferir e complementar os resultados obtidos para as taxas de ventilação.

Na secção final deste capítulo procede-se à análise da concentração de dióxido de carbono nos quartos durante a ocupação nocturna com o objectivo de obter uma relação entre a concentração interior de CO₂ e os níveis de qualidade do ar interior.

6.2 Relação entre a concentração de CO₂ e a ocupação do compartimento

A aplicação das técnicas do método do gás traçador na determinação da taxa de ventilação exige uma análise muito cuidada do conjunto dos valores experimentais obtidos para a concentração interior de CO₂. No presente trabalho, esta análise baseia-se no facto de os valores da concentração do dióxido de carbono presente no quarto permitirem identificar os períodos de permanência dos ocupantes nos respectivos quartos.

Com o objectivo de exemplificar a análise da variação da concentração de CO₂ ao longo do tempo, foi seleccionado o conjunto de valores apresentado na figura 6.1, correspondentes a um período de vinte e quatro horas do quarto T e que se considera representativo da rotina diária. A observação do gráfico permite distinguir com clareza os intervalos de tempo de ocupação dos intervalos de desocupação. São assinalados na figura 6.1, os instantes em que se verifica a entrada e a saída do compartimento, bem como outro tipo de eventos pontuais com impacte na taxa de ventilação (abertura da janela ou da porta).

A análise da figura 6.1 permite a identificação dos seguintes eventos:

- às 20:00 h do dia 20 de Fevereiro o ocupante regressa a casa e entra no quarto observando-se um conseqüente aumento da concentração de CO₂;
- cerca das 21:45 h o ocupante sai do quarto que fica vazio durante a hora seguinte; ocorre um decaimento na concentração de dióxido de carbono;
- às 22:45 h o ocupante volta em definitivo ao quarto para dormir; a partir desse instante o valor da concentração de CO₂ aumenta continuamente atingindo um estado de equilíbrio com um valor de aproximadamente 1700 ppm, cerca das 5:00 h do dia 21 de Fevereiro;
- às 7:00 h o ocupante terá acordado e saído do quarto por algum tempo reentrando cerca de 30 minutos mais tarde;

- às 8:00 h volta a ausentar-se do quarto para completar as suas actividades matinais, tendo deixado a porta aberta o que corresponde a um decaimento acentuado da concentração de CO₂;

- às 8:45 h entra brevemente no quarto e logo depois volta a sair, desta vez definitivamente;

- cerca das 10:30 h observa-se uma alteração no decaimento da concentração de CO₂ devida à abertura da janela para arejamento; esta é fechada uma hora mais tarde, num instante em que se regista uma concentração inferior a 500 ppm. O aumento da concentração de CO₂ que se verifica logo após o fecho da janela do quarto pode ser atribuído à ocupação temporária para limpeza e arrumação e também à existência de um gradiente de concentração entre o interior do quarto e os outros compartimentos adjacentes da habitação.

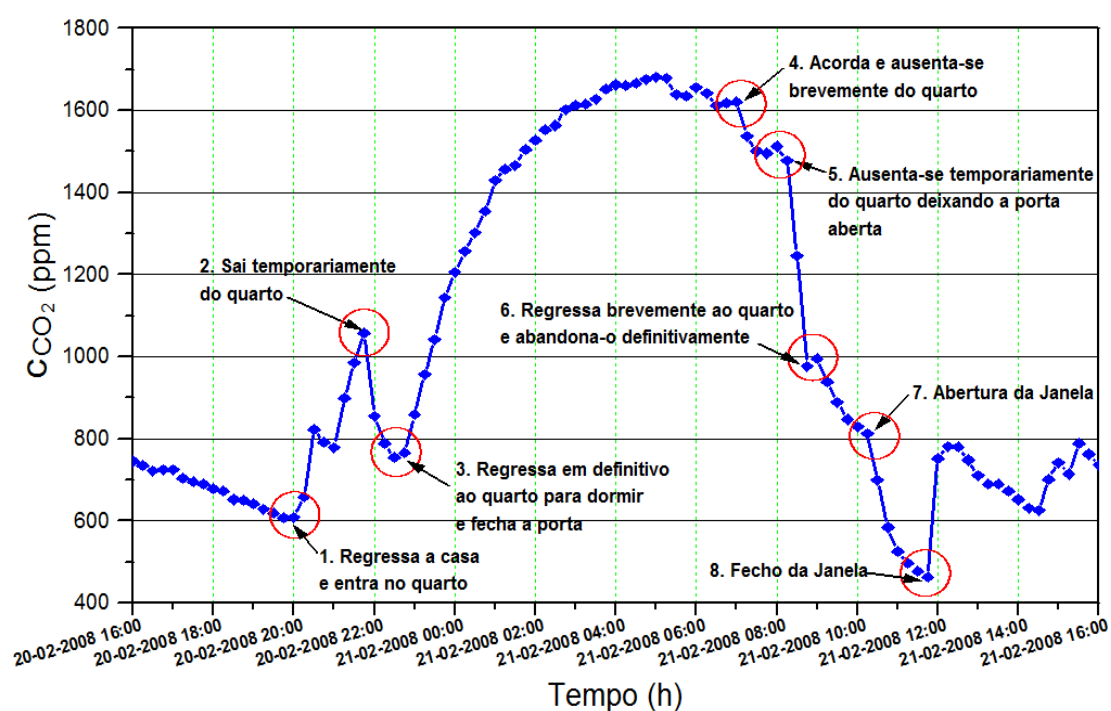


Figura 6.1 – Relação entre a variação da concentração de CO₂ e a ocupação do compartimento

6.3 Determinação da taxa de renovação horária efectiva pela técnica do decaimento

Como foi referido no capítulo 4, representando graficamente os valores do logaritmo natural da diferença entre a concentração do gás traçador no interior e a sua concentração no exterior em função do tempo, o módulo do declive da recta corresponde à renovação horária no intervalo de tempo considerado para as medições (equação 4.8)

A metodologia seguida na análise de resultados e cálculos é apresentada de seguida:

- numa primeira fase procedeu-se à observação cuidada dos registos gráficos da evolução da concentração de CO₂ (ppm) obtidos ao longo dos 45 dias em que decorreram as medições;

- com o objectivo de restringir a análise a dados elegíveis, fez-se uma pré-selecção dos valores experimentais de decaimento com características semelhantes à curva teórica;

- paralelamente foram analisados os registos dos hábitos diários dos ocupantes e relacionadas as suas rotinas com as flutuações observadas no decaimento da concentração;

- seguidamente foram analisados os dados referentes aos dias pré-seleccionados e de entre estes foram escolhidos os que correspondiam a intervalos de tempo para os quais se verificavam as hipóteses de regime de ventilação permanente, falta de produção do gás traçador e medições que se prologam por um intervalo de tempo idêntico à “constante de tempo nominal”;

- procedeu-se ao cálculo da R_{ph} pela técnica do decaimento, aplicando os dois métodos descritos no capítulo 4:

- R_{ph} calculado como média dos módulos dos declives entre duas medições sucessivas durante o intervalo de tempo de medição (equação 4.9);
- R_{ph} obtido a partir da equação da recta de regressão linear do método dos mínimos quadrados aplicado aos valores experimentais.

6.3.1 Determinação da taxa de renovação horária efectiva no quarto T

A observação dos gráficos da evolução da concentração de CO₂ (ppm) em função do tempo no quarto T (ver capítulo 5) permite concluir o seguinte:

- nos primeiros 30 a 45 minutos após o instante em que o ocupante acorda ocorre uma situação crítica, principalmente durante os dias úteis, que corresponde à saída do ocupante do quarto para a higiene matinal, voltando a entrar por algum tempo antes de desocupar definitivamente o quarto. Nos dias de fim-de-semana a ocupação do espaço é geralmente intermitente com períodos breves de desocupação seguidos de outros de permanência;

- a abertura da janela para arejamento do espaço é feita regularmente durante os dias úteis entre as 10 e as 11 horas da manhã. Este facto implica que nestes dias o tempo de decaimento com a janela fechada, ou seja o intervalo de tempo que medeia entre a saída do ocupante, que ocorre por volta das 9 horas, e a abertura das janelas é aproximadamente 1 a 2 horas.

De acordo com o procedimento indicado para a técnica do decaimento [25], o intervalo de tempo em que devem ser efectuadas as medições não deve ser inferior à “constante de tempo nominal”. A efectuação de cálculos prévios permite estimar valores entre 0,25 e 0,4 h⁻¹ para a renovação horária no compartimento pelo que os correspondentes valores de “constante de tempo nominal”, τ_n , estarão entre 4 h e 2,5 h. Assim, foram seleccionados os dias em que a abertura da janela era efectuada no mínimo 4 horas após a saída do ocupante ou nem sequer era feita, e os intervalos de tempo em que a curva de decaimento era aproximadamente exponencial.

Nas figuras 6.2 a 6.7 apresenta-se o decaimento da concentração de CO₂ e o correspondente gráfico de $\ln(c_t - c_{ext})$ em função do tempo, nos dias 15, 18 e 24 de Fevereiro e 27, 28 e 29 de Março de 2008. O intervalo de tempo de medição considerado foi igual ou superior a 4 h. Inclui-se o traçado da recta de regressão linear com base no método dos mínimos quadrado e a equação respectiva, cujo módulo do declive corresponde ao valor de R_{ph} segundo o método 2. É também apresentado o quadrado do coeficiente de correlação, R^2 .

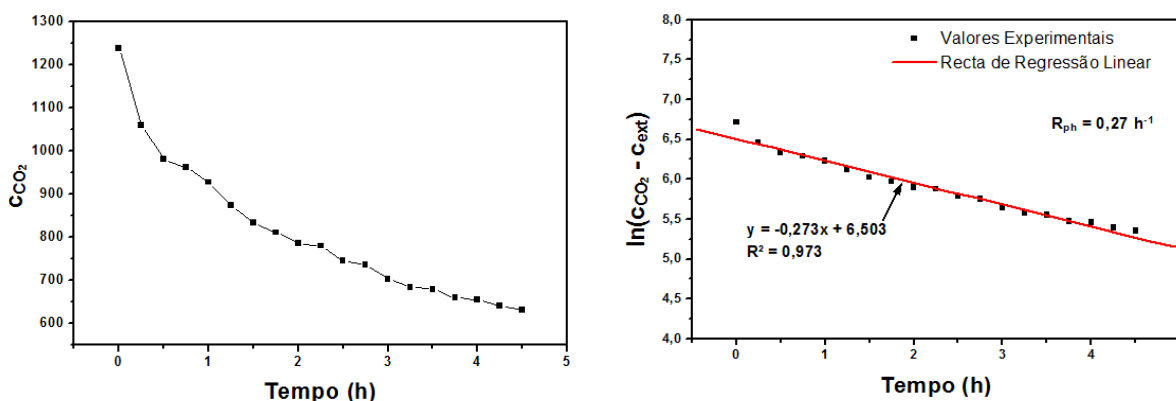


Figura 6.2 – Decaimento do CO₂ no Quarto T - 15 de Fevereiro

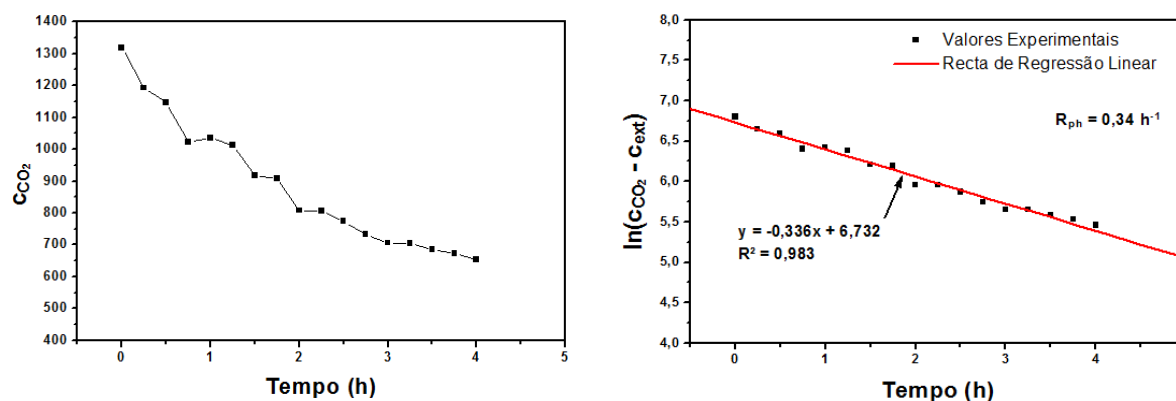


Figura 6.3 – Decaimento do CO₂ no Quarto T - 18 de Fevereiro

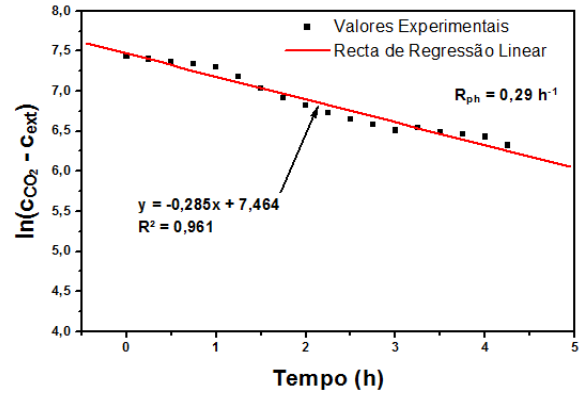
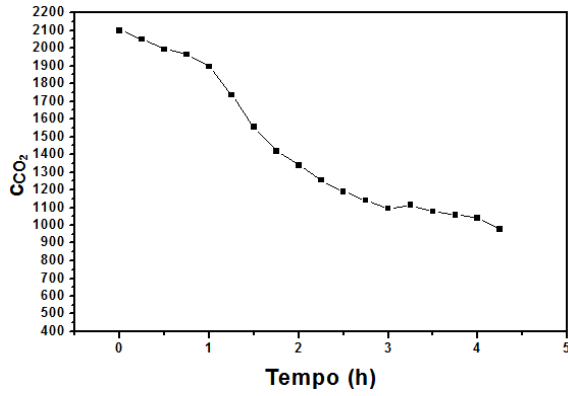


Figura 6.4 – Decaimento do CO₂ no Quarto T - 24 de Fevereiro

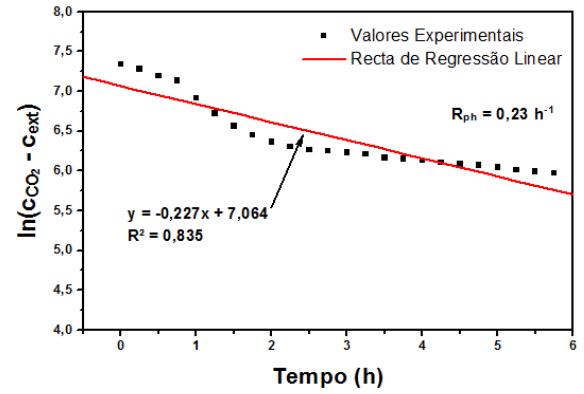
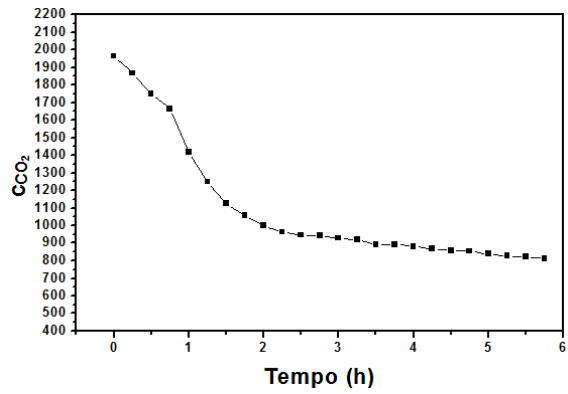


Figura 6.5 – Decaimento do CO₂ no Quarto T - 27 de Março

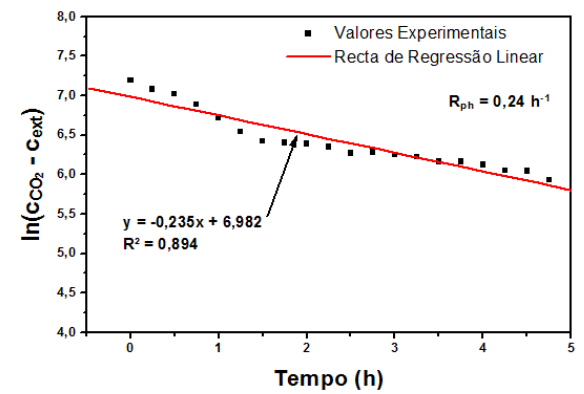
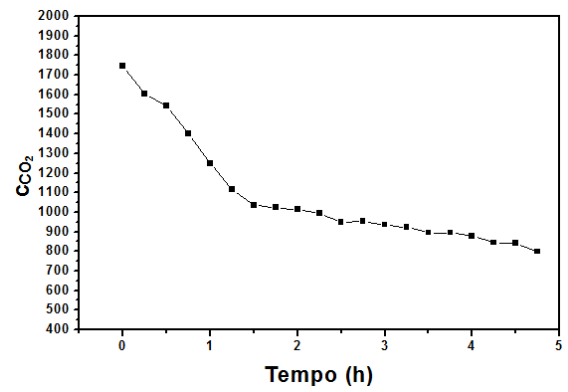


Figura 6.6 – Decaimento do CO₂ no Quarto T - 28 de Março

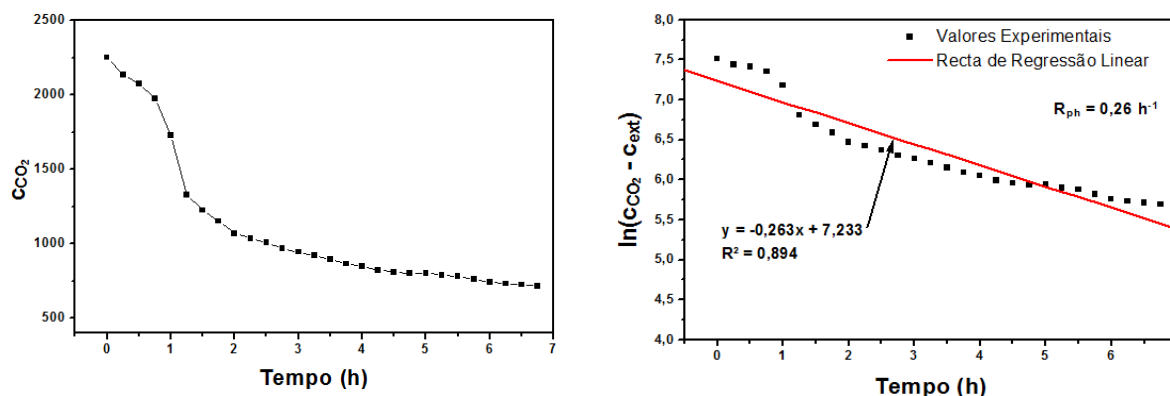


Figura 6.7 – Decaimento do CO₂ no Quarto T - 29 de Março

A aplicação do método que corresponde ao cálculo da média dos módulos dos declives entre dois registos sucessivos (método 1) aos valores seleccionados resulta no conjunto de valores de R_{ph} apresentados nos quadros 6.1 a 6.6. Como se pode observar, a média dos módulos dos diferentes declives obtidos entre registos sucessivos corresponde para cada um dos dias a um valor médio de renovação horária.

Quadro 6.1 – Cálculo de R_{ph} pelo

método 1 - Quarto T - 15 de Fevereiro

Tempo (h)	R_{ph} (h ⁻¹)	Tempo (h)	R_{ph} (h ⁻¹)
0 - 0,25	0,99	2,25 - 2,5	0,41
0,25 - 0,5	0,52	2,5 - 2,75	0,11
0,5 - 0,75	0,14	2,75 - 3	0,44
0,75 - 1	0,26	3 - 3,25	0,28
1 - 1,25	0,45	3,25 - 3,5	0,08
1,25 - 1,5	0,38	3,5 - 3,75	0,32
1,5 - 1,75	0,22	3,75 - 4	0,07
1,75 - 2	0,28	4 - 4,25	0,25
2 - 2,25	0,06	4,25 - 4,5	0,19
Valor Médio de R_{ph} (h⁻¹)		0,30	

Quadro 6.2 – Cálculo de R_{ph} pelo

método 1 - Quarto T - 18 de Fevereiro

Tempo (h)	R_{ph} (h ⁻¹)	Tempo (h)	R_{ph} (h ⁻¹)
0 - 0,25	0,61	2 - 2,25	0,01
0,25 - 0,5	0,24	2,25 - 2,5	0,36
0,5 - 0,75	0,75	2,5 - 2,75	0,49
0,75 - 1	-0,08	2,75 - 3	0,36
1 - 1,25	0,15	3 - 3,25	0,01
1,25 - 1,5	0,71	3,25 - 3,5	0,28
1,5 - 1,75	0,07	3,5 - 3,75	0,20
1,75 - 2	0,93	3,75 - 4	0,30
Valor Médio de R_{ph} (h⁻¹)		0,34	

Quadro 6.3 – Cálculo de R_{ph} pelo

método 1 - Quarto T - 24 de Fevereiro

Tempo (h)	R_{ph} (h ⁻¹)	Tempo (h)	R_{ph} (h ⁻¹)
0 - 0,25	0,12	2 - 2,25	0,38
0,25 - 0,5	0,14	2,25 - 2,5	0,32
0,5 - 0,75	0,07	2,5 - 2,75	0,27
0,75 - 1	0,18	2,75 - 3	0,26
1 - 1,25	0,46	3 - 3,25	-0,11
1,25 - 1,5	0,60	3,25 - 3,5	0,21
1,5 - 1,75	0,50	3,5 - 3,75	0,12
1,75 - 2	0,34	3,75 - 4	0,12
Valor Médio de R_{ph} (h⁻¹)		0,25	

Quadro 6.4 – Cálculo de R_{ph} pelo

método 1 - Quarto T - 27 de Março

Tempo (h)	R_{ph} (h ⁻¹)	Tempo (h)	R_{ph} (h ⁻¹)
0 - 0,25	0,26	3 - 3,25	0,09
0,25 - 0,5	0,34	3,25 - 3,5	0,21
0,5 - 0,75	0,27	3,5 - 3,75	0,01
0,75 - 1	0,88	3,75 - 4	0,09
1 - 1,25	0,75	4 - 4,25	0,12
1,25 - 1,5	0,64	4,25 - 4,5	0,08
1,5 - 1,75	0,41	4,5 - 4,75	0,04
1,75 - 2	0,38	4,75 - 5	0,14
2 - 2,25	0,26	5 - 5,25	0,12
2,25 - 2,5	0,14	5,25 - 5,5	0,06
2,5 - 2,75	0,03	5,5 - 5,75	0,08
2,75 - 3	0,09		
Valor Médio de R_{ph} (h⁻¹)		0,24	

Quadro 6.5 – Cálculo de R_{ph} pelo método 1 - Quarto T - 28 de Março

Tempo (h)	R_{ph} (h^{-1})	Tempo (h)	R_{ph} (h^{-1})
0 - 0,25	0,44	2,5 - 2,75	-0,04
0,25 - 0,5	0,22	2,75 - 3	0,13
0,5 - 0,75	0,54	3 - 3,25	0,12
0,75 - 1	0,67	3,25 - 3,5	0,22
1 - 1,25	0,71	3,5 - 3,75	0,00
1,25 - 1,5	0,49	3,75 - 4	0,15
1,5 - 1,75	0,07	4 - 4,25	0,30
1,75 - 2	0,06	4,25 - 4,5	0,04
2 - 2,25	0,14	4,5 - 4,75	0,42
2,25 - 2,5	0,33		
Valor Médio de R_{ph} (h^{-1})		0,26	

Quadro 6.6 – Cálculo de R_{ph} pelo método 1 - Quarto T - 29 de Março

Tempo (h)	R_{ph} (h^{-1})	Tempo (h)	R_{ph} (h^{-1})
0 - 0,25	0,27	3,5 - 3,75	0,25
0,25 - 0,5	0,13	3,75 - 4	0,17
0,5 - 0,75	0,25	4 - 4,25	0,24
0,75 - 1	0,69	4,25 - 4,5	0,13
1 - 1,25	1,47	4,5 - 4,75	0,09
1,25 - 1,5	0,49	4,75 - 5	-0,03
1,5 - 1,75	0,38	5 - 5,25	0,17
1,75 - 2	0,49	5,25 - 5,5	0,09
2 - 2,25	0,20	5,5 - 5,75	0,23
2,25 - 2,5	0,19	5,75 - 6	0,23
2,5 - 2,75	0,27	6 - 6,25	0,11
2,75 - 3	0,19	6,25 - 6,5	0,08
3 - 3,25	0,19	6,5 - 6,75	0,11
3,25 - 3,5	0,22	6,75 - 7	0,15
Valor Médio de R_{ph} (h^{-1})		0,27	

No quadro 6.7 e na figura 6.8 apresentam-se os valores obtidos para o número de renovações horárias pelo método 1 e pelo método que corresponde à utilização da equação da recta de regressão linear (método 2) Optou-se por apresentar os valores de R_{ph} com aproximação às centésimas atendendo à semelhança dos resultados obtidos pelos dois métodos.

Quadro 6.7 – Valores da taxa de renovação horária do quarto T

Dias	R_{ph} (h^{-1})	
	Método 1	Método 2
15 de Fevereiro	0,30	0,27
18 de Fevereiro	0,34	0,34
24 de Fevereiro	0,25	0,29
27 de Março	0,24	0,23
28 de Março	0,26	0,24
29 de Março	0,27	0,26
Valores médios	0,28	0,27
	0,27	

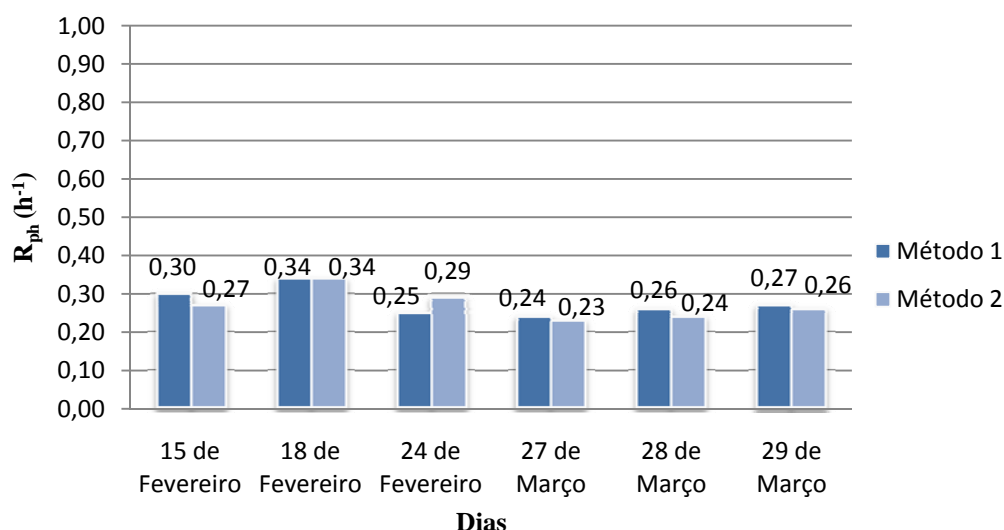


Figura 6.8 – Taxa de renovação horária do quarto T

Com se pode observar na figura 6.8, os valores de R_{ph} calculados pelos dois métodos são semelhantes, sendo a diferença entre as médias dos resultados obtidos igual a $0,01h^{-1}$. Tendo em conta a concordância dos resultados, pode concluir-se que a aplicação da regressão linear aos valores experimentais é o método mais adequado, devido à maior simplicidade de cálculo. Constata-se que no quarto T os valores de R_{ph} determinados variam entre 0,2 e $0,3 h^{-1}$.

O valor médio de R_{ph} calculado pela técnica do decaimento, para os intervalos de tempo ao longo de qual estão reunidas as condições anteriormente definidas, é aproximadamente igual a $0,3 h^{-1}$.

6.3.2 Determinação da taxa de renovação horária efectiva no quarto B

Seguindo uma metodologia semelhante à usada para o quarto T, foram efectuados cálculos prévios que permitem estimar valores entre $0,4$ e $0,8 h^{-1}$ para a renovação horária no quarto em estudo. Os correspondentes valores de “constante de tempo nominal”, τ_n , estarão entre 2,5h e 1,25h.

Nas figuras 6.9 a 6.14 apresenta-se o decaimento da concentração de CO_2 e o correspondente gráfico de $\ln(c_t - c_{ext})$ em função do tempo nos dias 15, 21, 26 e 27 de Fevereiro e 6, 9 e 13 de Março de 2008. O intervalo de tempo considerado para o decaimento foi igual ou superior a 2,25h. A vermelho está representada a recta de regressão linear com base no método dos mínimos quadrados, a equação respectiva e o quadrado do coeficiente de correlação.

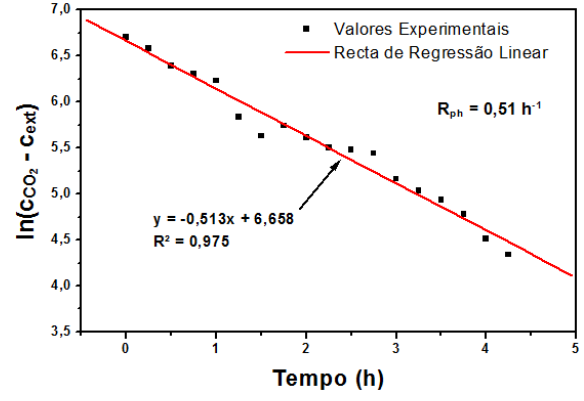
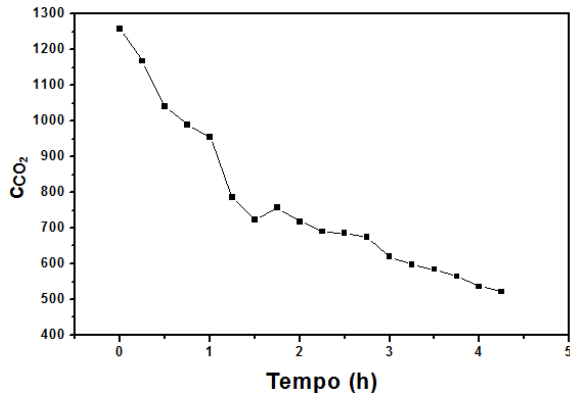


Figura 6.9 – Decaimento do CO₂ no Quarto B - 15 de Fevereiro

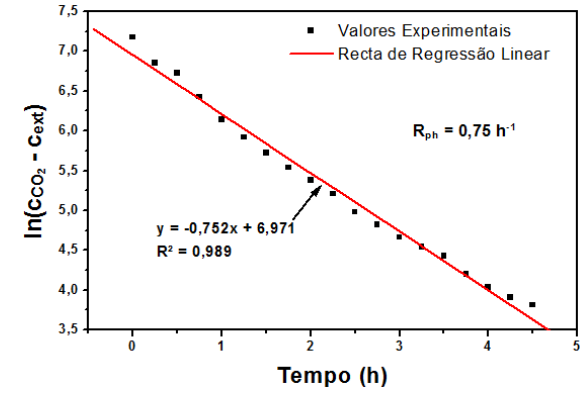
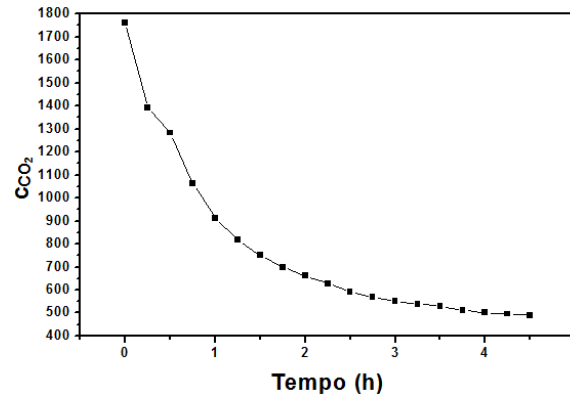


Figura 6.10 – Decaimento do CO₂ no Quarto B - 21 de Fevereiro

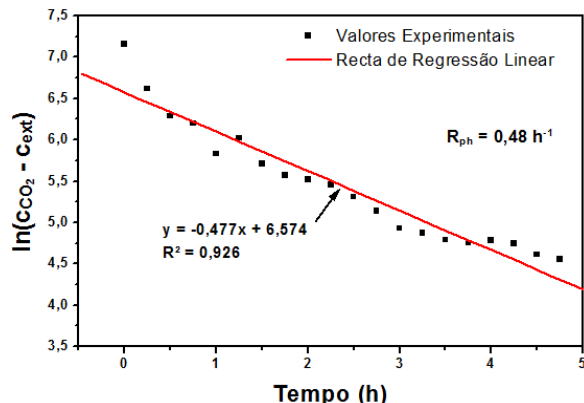
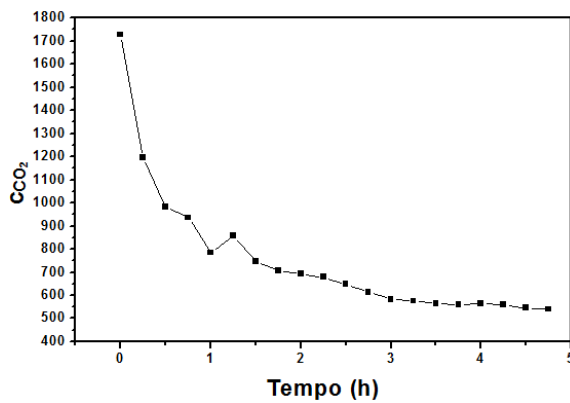


Figura 6.11 – Decaimento do CO₂ no Quarto B - 26 de Fevereiro

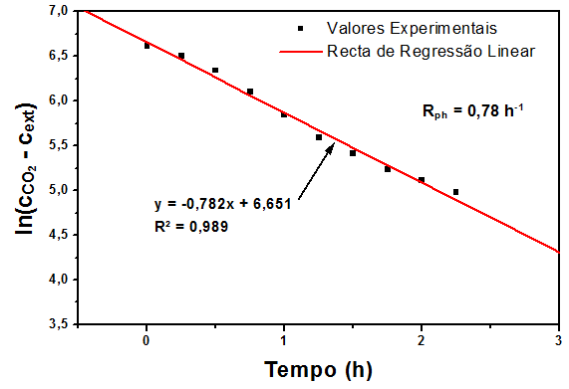
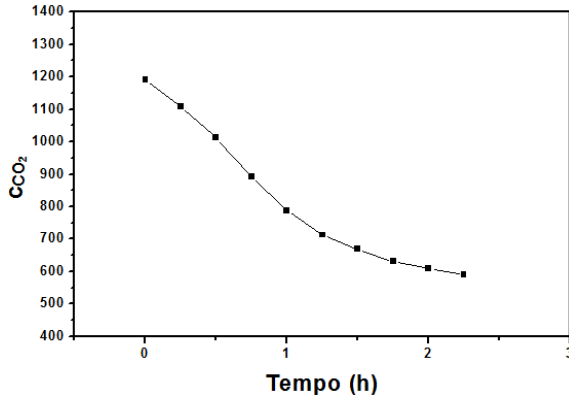


Figura 6.12 – Decaimento do CO₂ no Quarto B - 27 de Fevereiro

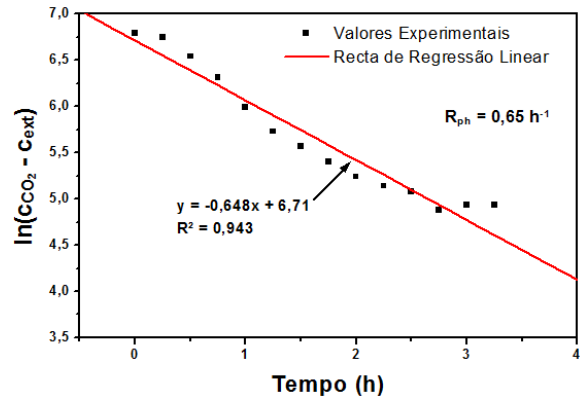
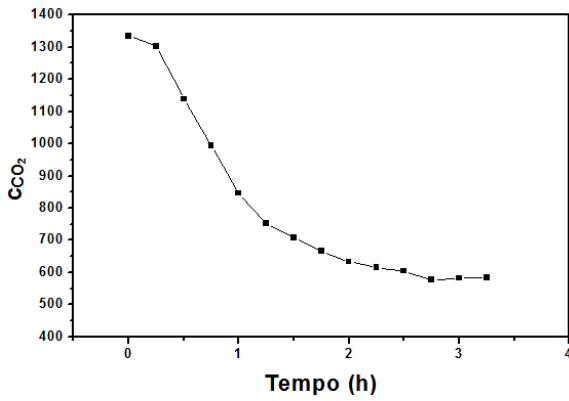


Figura 6.13 – Decaimento do CO₂ no Quarto B - 6 de Março

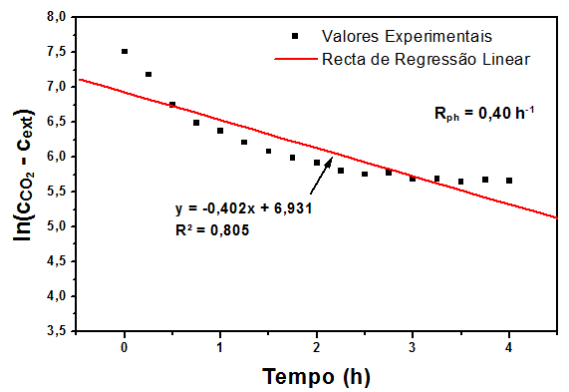
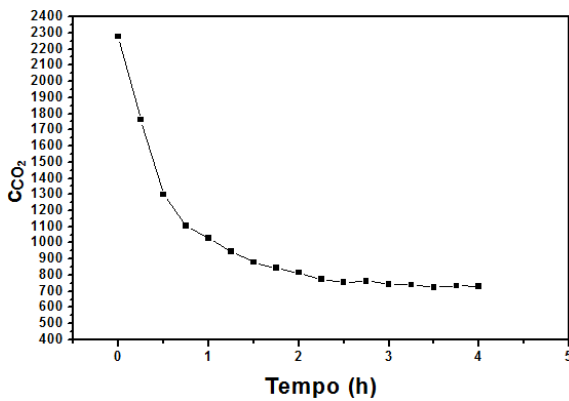


Figura 6.14 – Decaimento do CO₂ no Quarto B - 9 de Março

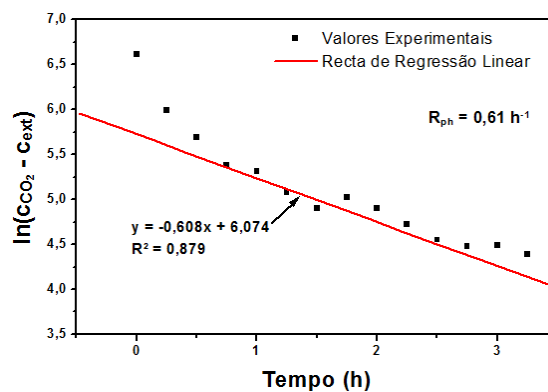
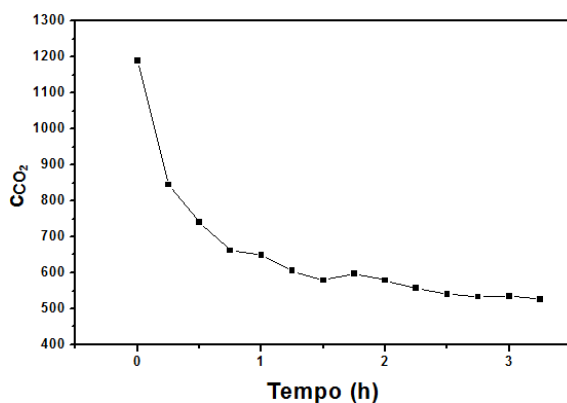


Figura 6.15 – Decaimento do CO₂ no Quarto B - 13 de Março

Nos quadros 6.8 a 6.14 apresentam-se os valores de R_{ph} obtidos pela aplicação do método 1 aos valores seleccionados.

Quadro 6.8 – Cálculo de R_{ph} pelo

método 1 - Quarto B - 15 de Fevereiro

Tempo (h)	R_{ph} (h ⁻¹)	Tempo (h)	R_{ph} (h ⁻¹)
0 - 0,25	0,47	2 - 2,25	0,43
0,25 - 0,5	0,77	2,25 - 2,5	0,07
0,5 - 0,75	0,37	2,5 - 2,75	0,19
0,75 - 1	0,26	2,75 - 3	1,09
1 - 1,25	1,60	3 - 3,25	0,54
1,25 - 1,5	0,80	3,25 - 3,5	0,38
1,5 - 1,75	-0,45	3,5 - 3,75	0,62
1,75 - 2	0,53	3,75 - 4	1,07
Valor Médio de R_{ph} (h⁻¹)		0,55	

Quadro 6.9 – Cálculo de R_{ph} pelo

método 1 - Quarto B - 21 de Fevereiro

Tempo (h)	R_{ph} (h ⁻¹)	Tempo (h)	R_{ph} (h ⁻¹)
0 - 0,25	1,32	2,25 - 2,5	0,90
0,25 - 0,5	0,49	2,5 - 2,75	0,65
0,5 - 0,75	1,22	2,75 - 3	0,63
0,75 - 1	1,13	3 - 3,25	0,48
1 - 1,25	0,90	3,25 - 3,5	0,45
1,25 - 1,5	0,79	3,5 - 3,75	0,90
1,5 - 1,75	0,73	3,75 - 4	0,72
1,75 - 2	0,63	4 - 4,25	0,45
2 - 2,25	0,68	4,25 - 4,5	0,42
Valor Médio de R_{ph} (h⁻¹)		0,75	

Quadro 6.10 – Cálculo de R_{ph} pelo

método 1 - Quarto B - 26 de Fevereiro

Tempo (h)	R_{ph} (h ⁻¹)	Tempo (h)	R_{ph} (h ⁻¹)
0 - 0,25	2,13	2,5 - 2,75	0,71
0,25 - 0,5	1,34	2,75 - 3	0,83
0,5 - 0,75	0,37	3 - 3,25	0,24
0,75 - 1	1,48	3,25 - 3,5	0,32
1 - 1,25	-0,78	3,5 - 3,75	0,14
1,25 - 1,5	1,24	3,75 - 4	-0,10
1,5 - 1,75	0,57	4 - 4,25	0,17
1,75 - 2	0,20	4,25 - 4,5	0,52
2 - 2,25	0,25	4,5 - 4,75	0,21
2,25 - 2,5	0,57		
Valor Médio de R_{ph} (h⁻¹)		0,55	

Quadro 6.11 – Cálculo de R_{ph} pelo

método 1 - Quarto B - 27 de Fevereiro

Tempo (h)	R_{ph} (h ⁻¹)	Tempo (h)	R_{ph} (h ⁻¹)
0 - 0,25	0,46	1,25 - 1,5	0,72
0,25 - 0,5	0,63	1,5 - 1,75	0,72
0,5 - 0,75	0,96	1,75 - 2	0,50
0,75 - 1	1,05	2 - 2,25	0,49
1 - 1,25	0,99		
Valor Médio de R_{ph} (h⁻¹)		0,72	

Quadro 6.12 - Cálculo de R_{ph} pelo método 1 - Quarto B - 6 de Março

Tempo (h)	R_{ph} (h^{-1})	Tempo (h)	R_{ph} (h^{-1})
0 - 0,25	0,15	1,75 - 2	0,66
0,25 - 0,5	0,84	2 - 2,25	0,38
0,5 - 0,75	0,93	2,25 - 2,5	0,27
0,75 - 1	1,26	2,5 - 2,75	0,77
1 - 1,25	1,07	2,75 - 3	-0,18
1,25 - 1,5	0,63	3 - 3,25	-0,03
1,5 - 1,75	0,66		
Valor Médio de R_{ph} (h^{-1})		0,57	

Quadro 6.13 – Cálculo de R_{ph} pelo método 1 - Quarto B - 9 de Março

Tempo (h)	R_{ph} (h^{-1})	Tempo (h)	R_{ph} (h^{-1})
0 - 0,25	1,32	2 - 2,25	0,48
0,25 - 0,5	1,74	2,25 - 2,5	0,20
0,5 - 0,75	1,04	2,5 - 2,75	-0,08
0,75 - 1	0,49	2,75 - 3	0,29
1 - 1,25	0,61	3 - 3,25	0,03
1,25 - 1,5	0,56	3,25 - 3,5	0,19
1,5 - 1,75	0,35	3,5 - 3,75	-0,11
1,75 - 2	0,29	3,75 - 4	0,04
Valor Médio de R_{ph} (h^{-1})		0,46	

Quadro 6.14 – Cálculo de R_{ph} pelo método 1 - Quarto B -13 de Março

Tempo (h)	R_{ph} (h^{-1})	Tempo (h)	R_{ph} (h^{-1})
0 - 0,25	2,49	1,75 - 2	0,50
0,25 - 0,5	1,21	2 - 2,25	0,72
0,5 - 0,75	1,25	2,25 - 2,5	0,66
0,75 - 1	0,25	2,5 - 2,75	0,31
1 - 1,25	0,95	2,75 - 3	-0,05
1,25 - 1,5	0,71	3 - 3,25	0,38
1,5 - 1,75	-0,50		
Valor Médio de R_{ph} (h^{-1})		0,68	

No quadro 6.15 e na figura 6.16 apresentam-se os valores obtidos para o número de renovações horárias pelos dois métodos utilizados para o cálculo do declive. O método 1 corresponde ao cálculo da média dos módulos dos declives entre dois registos sucessivos e o processo 2 à utilização da equação da recta de regressão linear.

Quadro 6.15 – Valores da taxa de renovação horária do quarto B

Dias	R_{ph} (h^{-1})	
	Método 1	Método 2
15 de Fevereiro	0,55	0,51
21 de Fevereiro	0,75	0,75
26 de Fevereiro	0,55	0,48
27 de Fevereiro	0,72	0,78
6 de Março	0,57	0,65
9 de Março	0,46	0,40
13 de Março	0,68	0,61
Valores médios	0,61	0,60
	0,60	

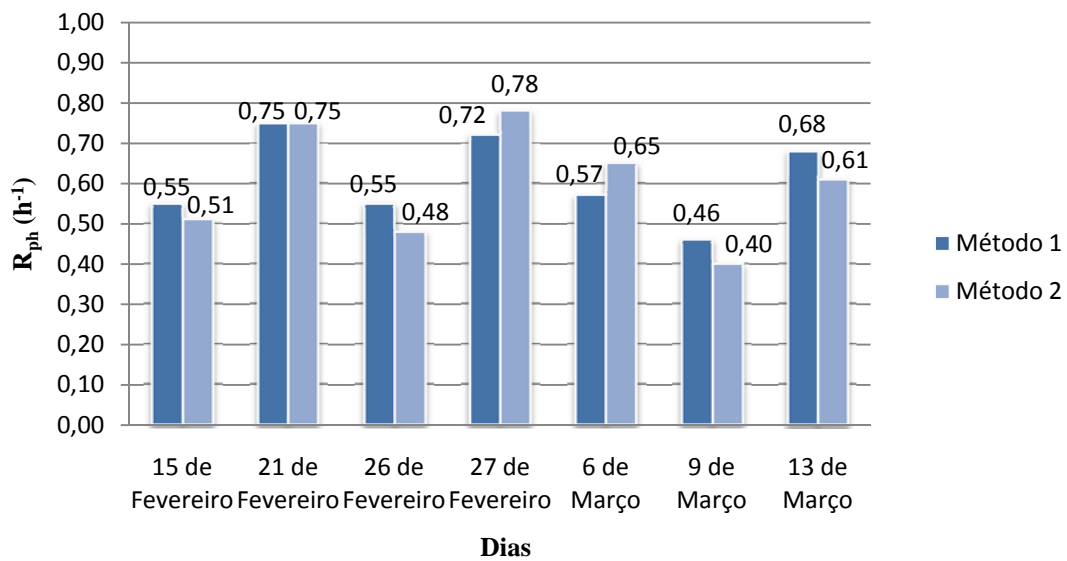


Figura 6.16 – Taxa de renovação horária do quarto B

Tal como se tinha verificado no quarto T, os valores de R_{ph} , nos intervalos de tempo considerados, não dependem significativamente do método como o declive foi calculado, sendo a diferença entre as médias dos resultados obtidos igual a $0,01h^{-1}$. Constata-se que no quarto B os valores de R_{ph} determinados variam entre 0,4 e $0,8 h^{-1}$.

O valor médio de R_{ph} calculado pela técnica do decaimento, para os intervalos de tempo ao longo de qual estão reunidas as condições anteriormente definidas, é aproximadamente igual a $0,6 h^{-1}$.

6.4 Determinação da renovação horária efectiva pela técnica do estado estacionário

A técnica da emissão constante utilizando como gás traçador o dióxido de carbono gerado pelos ocupantes, baseia-se na análise das concentrações do dióxido de carbono em estado estacionário, ou seja, quando as concentrações de CO_2 se mantêm praticamente constantes ao longo do tempo. Atingido o estado estacionário, o valor de R_{ph} é determinado pela equação 4.15.

A verificação da ocorrência de estado estacionário em cada um dos dias foi feita com base nos dois critérios seguintes [24]:

1. o intervalo de tempo de equilíbrio deve corresponder a um mínimo de 5 valores registados com intervalos de 15 minutos (o que corresponde a 1 hora);

2. a diferença entre as concentrações registadas durante uma hora não ser superior ao valor determinado pela equação 4.18

Com o objectivo de assegurar que a equação 4.15 seja aplicada a condições experimentais que, dentro dos condicionalismos existentes, verifiquem tanto quanto possível os pressupostos de base da técnica, a metodologia seguida na análise dos resultados foi a seguinte:

- observação das curvas correspondentes a todos os registos obtidos para cada um dos espaços em estudo;
- selecção dos dias em que aparentemente se verifica o estado estacionário;
- determinação do caudal de produção do CO₂ emitido pelos ocupantes;
- confirmação da ocorrência de estado estacionário nos dias seleccionados, de acordo com os critérios anteriormente indicados;
- determinação do número de renovações horárias, R_{ph}.

6.4.1 Determinação da taxa de renovação horária efectiva no quarto T

- **Determinação do caudal de CO₂ emitido nos intervalos de tempo em que o ocupante está a dormir.**

O quarto T é ocupado regularmente por uma única pessoa. A determinação do caudal de CO₂ emitido foi feita utilizando as equações 4.20 e 4.21. Atendendo às características do ocupante, 1,85 m de altura e a massa de 80 kg, o valor de A_D calculado pela equação 6.5 é 2,1m². Considerando $A_D = 2,1\text{m}^2$, $RQ = 0,83$ e $M = 0,8$ (ocupante a dormir) obtém-se por substituição na equação 4.21:

$$q_{CO_2} = 4,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Verificação da ocorrência de estado estacionário**

Substituindo na equação 4.18 os valores de q_{CO_2} e V respectivamente por $4,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e 42m^3 , obtém-se o valor de 17 ppm como máximo da alteração de concentrações para se poder considerar a existência de estado estacionário.

Utilizou-se este valor na análise dos dias pré-seleccionados pela observação dos gráficos dos registos do teor de CO₂ e obteve-se um conjunto de 10 dias em cujas madrugadas é atingido o estado estacionário: 15, 21 e 22 de Fevereiro e 1, 3, 4, 5, 7, 20 e 24 de Março de 2008. Foram incluídos na análise os dias 15 de Fevereiro, 1 e 3 de Março porque, embora

nestes dias se verificasse um desvio superior a 17 ppm, as alterações observadas correspondem a valores isolados no conjunto.

Constata-se que as concentrações de CO₂ estão dentro do limite de $\pm 3,5\%$ da concentração média no intervalo de medições em todos os dias analisados.

Com o objectivo de uniformizar o método, optou-se por efectuar os cálculos de R_{ph} a partir dos valores de concentração correspondentes a uma hora de medições em estado estacionário, para todos os dias mencionados. Verifica-se no entanto que em alguns dias o estado estacionário se prolonga por um período de tempo superior.

Nas figuras 6.17 a 6.26, apresentam-se os gráficos correspondentes a cada um dos dias mencionados e assinala-se o intervalo de equilíbrio considerado com uma marca vermelha.

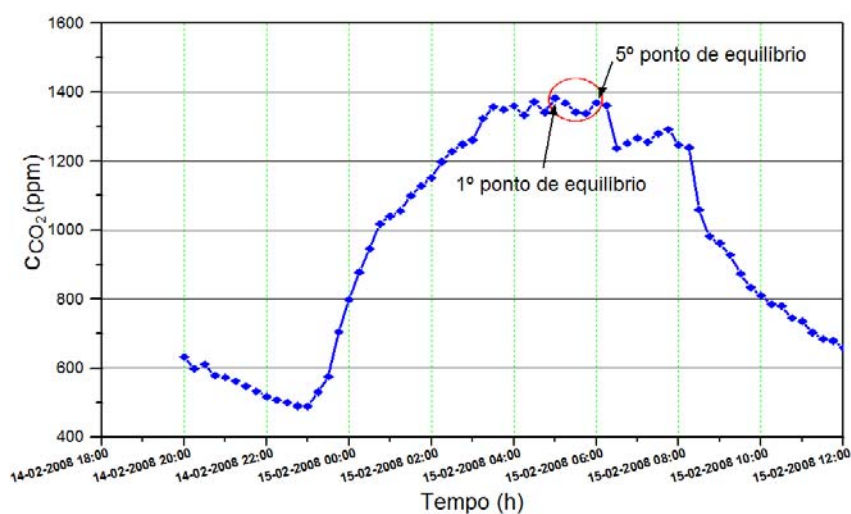


Figura 6.17 – Estado estacionário no quarto T - 15 de Fevereiro

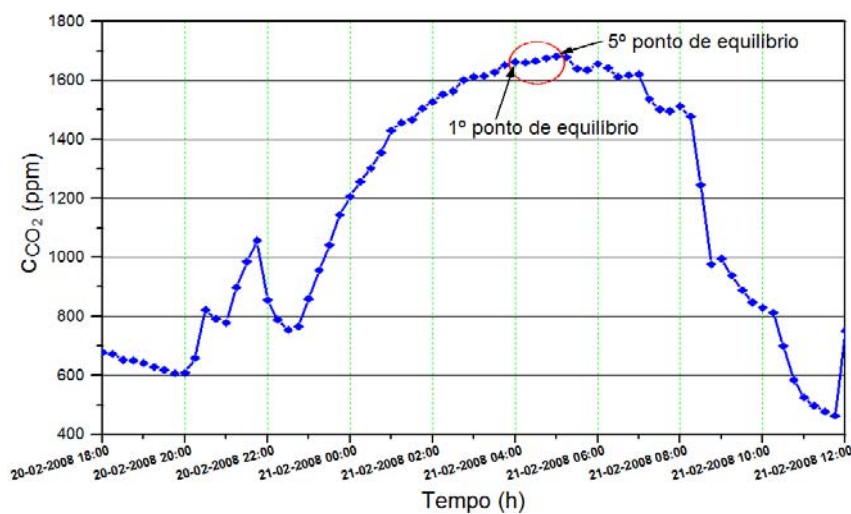


Figura 6.18 – Estado estacionário no quarto T - 21 de Fevereiro

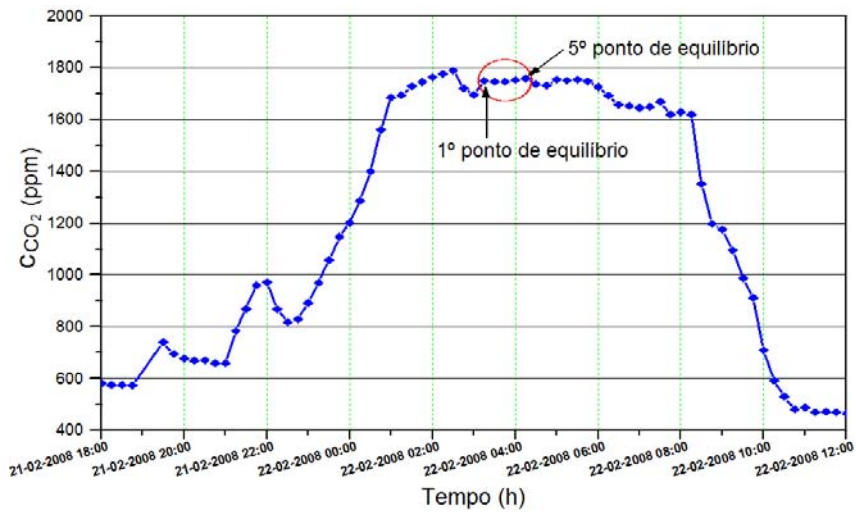


Figura 6.19 – Estado estacionário no quarto T - 22 de Fevereiro

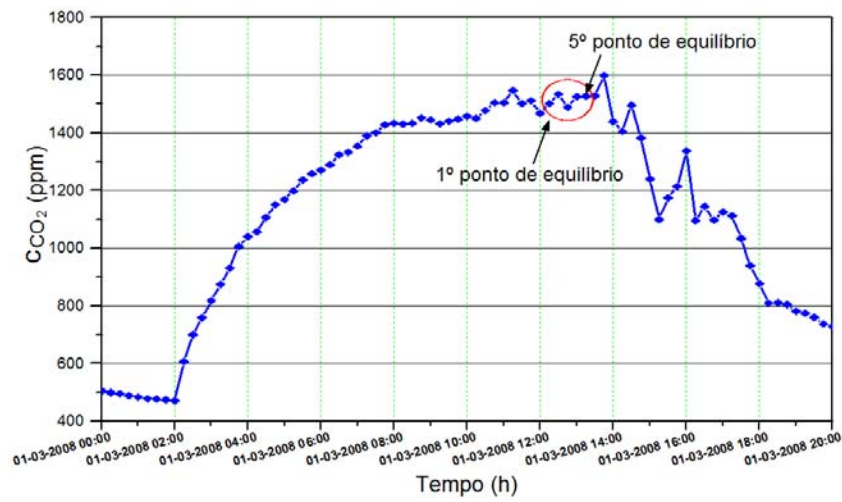


Figura 6.20 – Estado estacionário no quarto T - 1 de Março

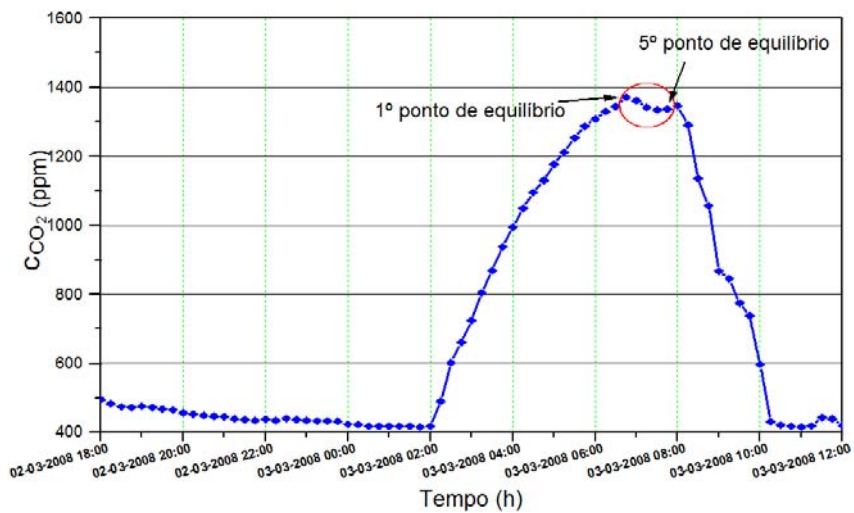


Figura 6.21 – Estado estacionário no quarto T - 3 de Março

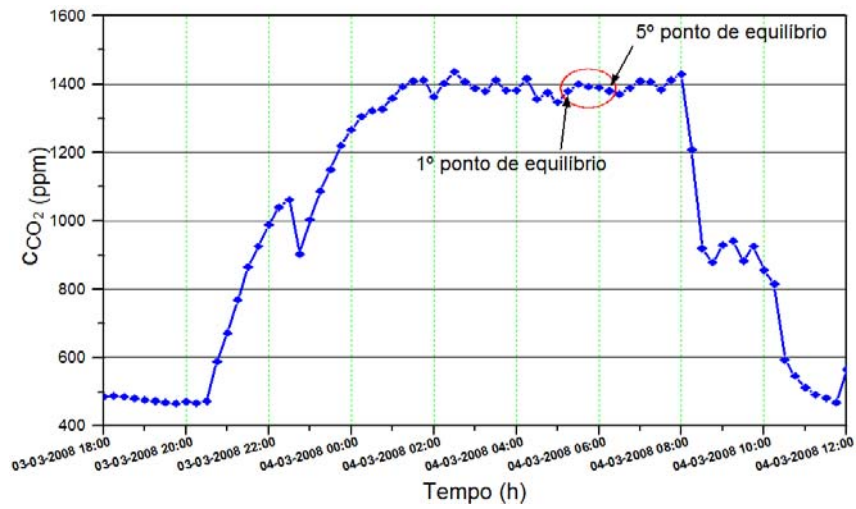


Figura 6.22 – Estado estacionário no quarto T - 4 de Março

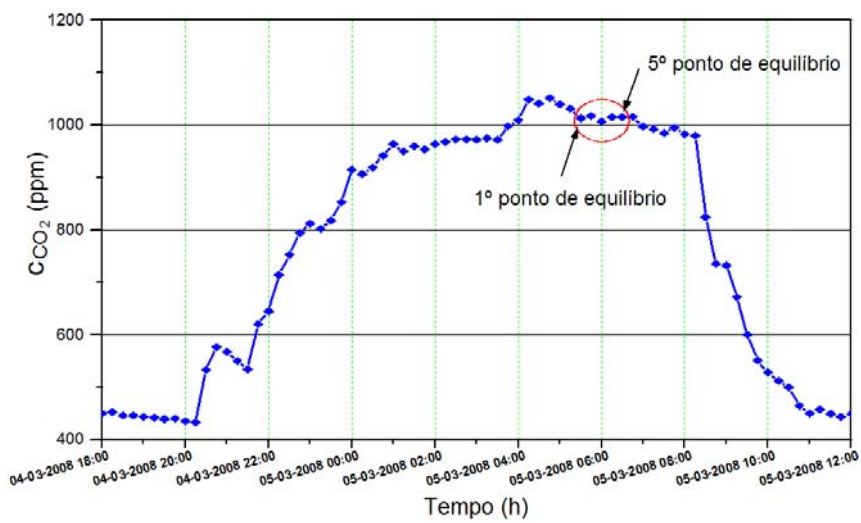


Figura 6.23 – Estado estacionário no quarto T - 5 de Março

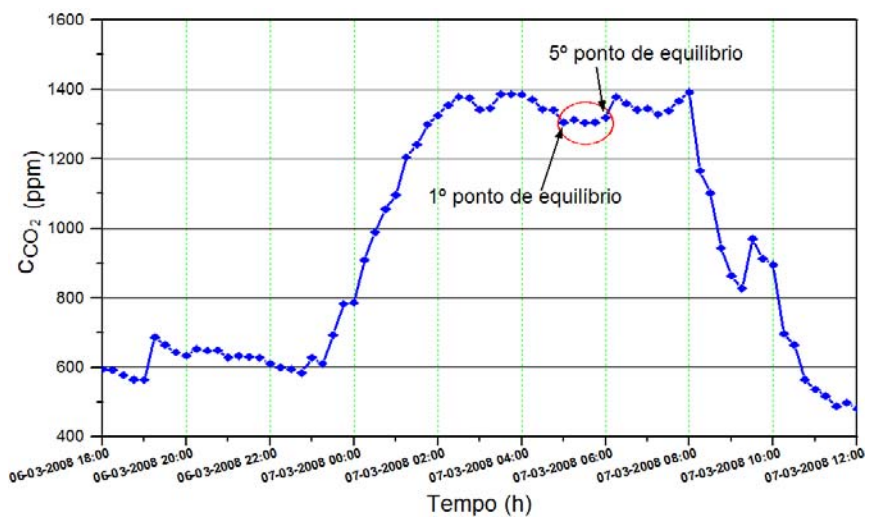


Figura 6.24 – Estado estacionário no quarto T - 7 de Março

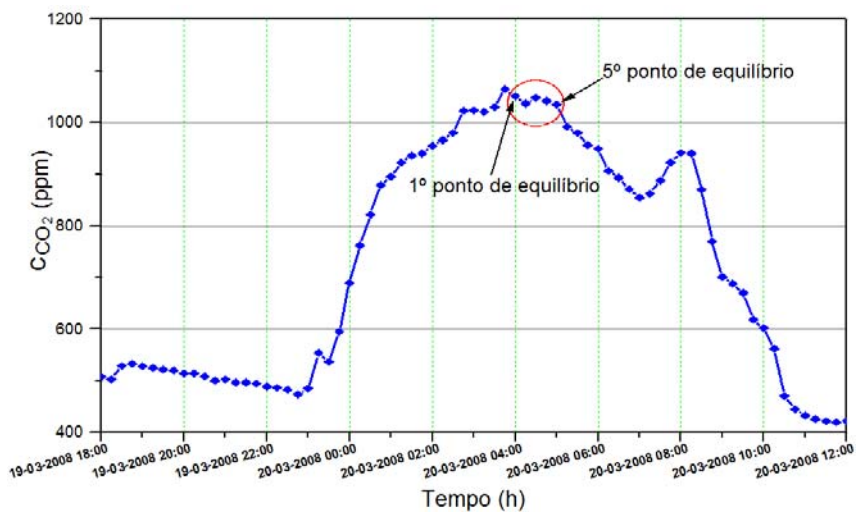


Figura 6.25 – Estado estacionário no quarto T - 20 de Março

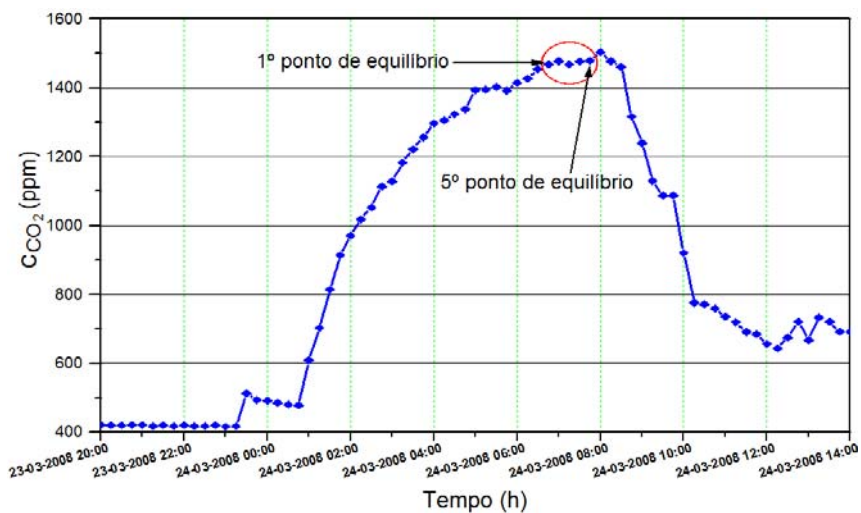


Figura 6.26 – Estado estacionário no quarto T - 24 de Março

- **Determinação do número de renovações horárias, R_{ph}**

No quadro 6.16 constam, para cada um dos dias analisados, os valores da concentração de CO_2 no equilíbrio, o valor médio correspondente e o valor de R_{ph} calculado pela equação 4.15. Indica-se também o valor do correspondente caudal de ventilação por pessoa, Q_p ($l.s^{-1}$).

Observa-se que em oito destes dez dias o valor R_{ph} está compreendido entre 0,3 e 0,4 h^{-1} e que nos dias 5 e 20 de Março o valor de R_{ph} apresenta um valor superior aos restantes, sendo 0,6 h^{-1} .

Na figura 6.27 apresentam-se os valores de R_{ph} obtidos pela técnica do equilíbrio sob a forma de gráfico, representando-se a vermelho o valor médio de 0,4 h^{-1} .

Quadro 6.16 – Cálculo de R_{ph} - Quarto T

Tempo (h)	15 de Fev.	21 de Fev.	22 de Fev.	1 de Mar.	3 de Mar.
0	1383	1662	1750	1502	1371
0,25	1368	1660	1746	1534	1361
0,5	1342	1666	1746	1489	1342
0,75	1338	1676	1753	1526	1335
1	1369	1681	1758	1527	1337
C_{CO_2} no equilíbrio (ppm)	1360	1669	1751	1516	1349
Q_p ($l.s^{-1}$)	4,3	3,2	3,0	3,7	4,3
R_{ph} (h^{-1})	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4

Tempo (h)	4 de Mar.	5 de Mar.	7 de Mar.	20 de Mar.	24 de Mar.
0	1379	1013	1305	1051	1468
0,25	1400	1017	1313	1037	1477
0,5	1393	1007	1304	1048	1468
0,75	1390	1015	1305	1042	1476
1	1380	1015	1319	1035	1479
C_{CO_2} no equilíbrio (ppm)	1388	1013	1309	1043	1474
Q_p ($l.s^{-1}$)	4,1	6,8	4,5	6,4	3,8
R_{ph} (h^{-1})	0,4	0,6	0,4	0,6	0,3

Valor médio de R_{ph}
0,4 h^{-1}

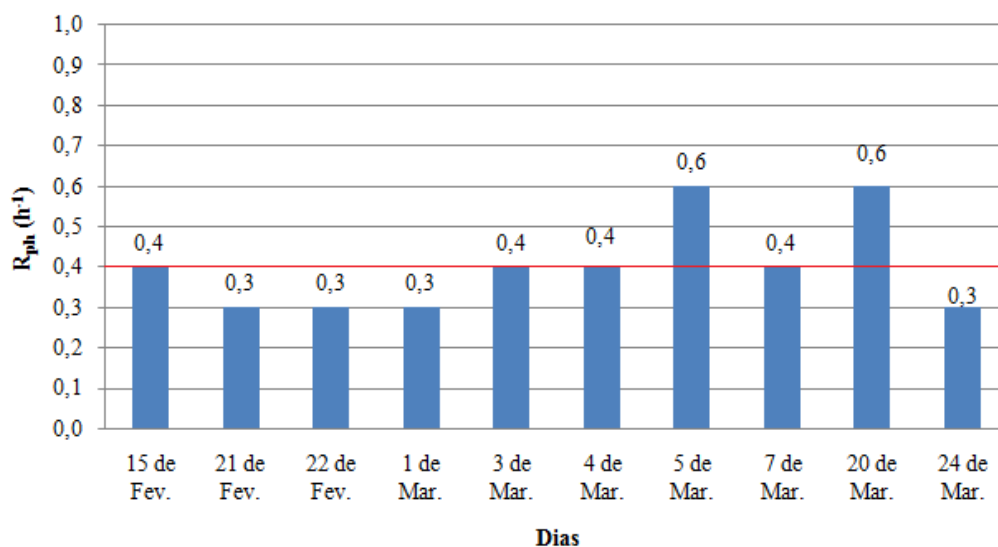


Figura 6.27 – Taxas de renovação horária - Quarto T

6.4.2 Determinação da taxa de renovação horária efectiva no quarto B

Como foi anteriormente referido, a campanha de medições foi realizada de modo a não causar alterações significativas nos hábitos diários dos residentes e somente após o cálculo das taxas de renovação horária pelo método do estado estacionário, foi obtida a informação de que os ocupantes do quarto B mantêm quase sempre a porta aberta enquanto dormem. Assim, o erro associado aos valores de R_{ph} que se apresentam seguidamente para o quarto B é muito elevado, como será justificado mais adiante.

- **Determinação do caudal de CO₂ emitido nos intervalos de tempo em que os ocupantes estão a dormir**

O quarto B é ocupado regularmente por duas pessoas. Atendendo a que as alturas e massas dos ocupantes do quarto B são semelhantes às dos ocupantes do quarto T adoptou-se o mesmo valor de caudal de CO₂ emitido por pessoa, $4,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, pelo que:

$$q_{CO_2} = 8,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Verificação da ocorrência de estado estacionário**

Substituindo na equação 4.18 os valores de q_{CO_2} e V respectivamente por $8,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e 35 m^3 , obtém-se o valor de 41 ppm como máximo da alteração de concentrações para se poder considerar a existência de estado estacionário. Aplicando esta condicionante aos valores experimentais obteve-se um conjunto de dez dias em cujas madrugadas é atingido o estado estacionário: 15, 17 e 23 de Fevereiro e 1, 2, 4, 5, 6, 10 e 11 de Março de 2008. Constata-se que em todos os dias considerados, as concentrações de CO₂ estão dentro do limite de $\pm 3,5 \%$ da concentração média no intervalo de tempo considerado.

Tal como no estudo do quarto T, também neste caso se optou por efectuar os cálculos de R_{ph} a partir dos valores de concentração correspondentes a uma hora de medições em estado estacionário para os diversos dias considerados, apesar de em alguns deles o estado estacionário se prolongar por um período de tempo superior.

Nas figuras 6.28 a 6.37, apresentam-se os gráficos correspondentes a cada um dos dias mencionados e assinala-se o intervalo de equilíbrio considerado com uma marca vermelha.

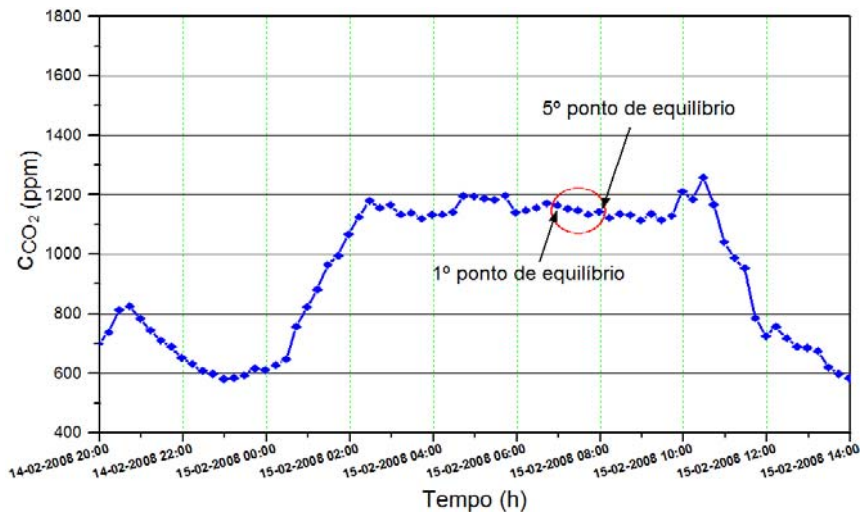


Figura 6.28 – Estado estacionário no quarto B - 15 de Fevereiro

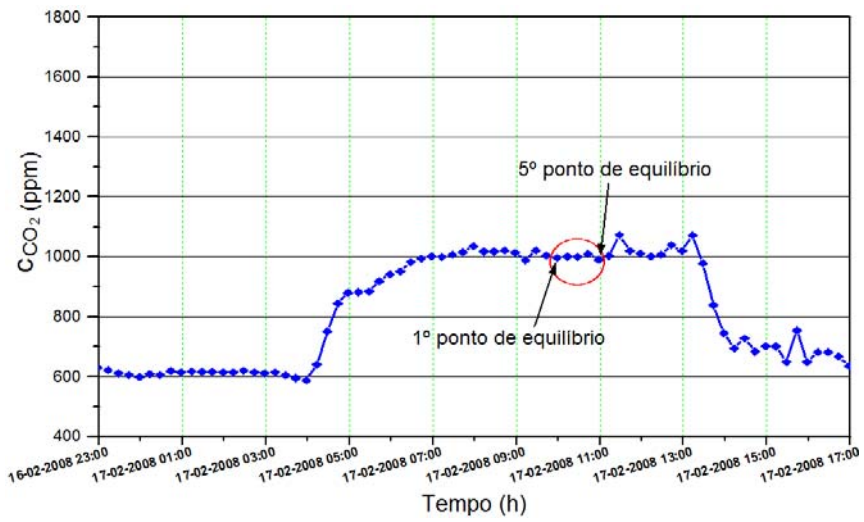


Figura 6.29 – Estado estacionário no quarto B - 17 de Fevereiro

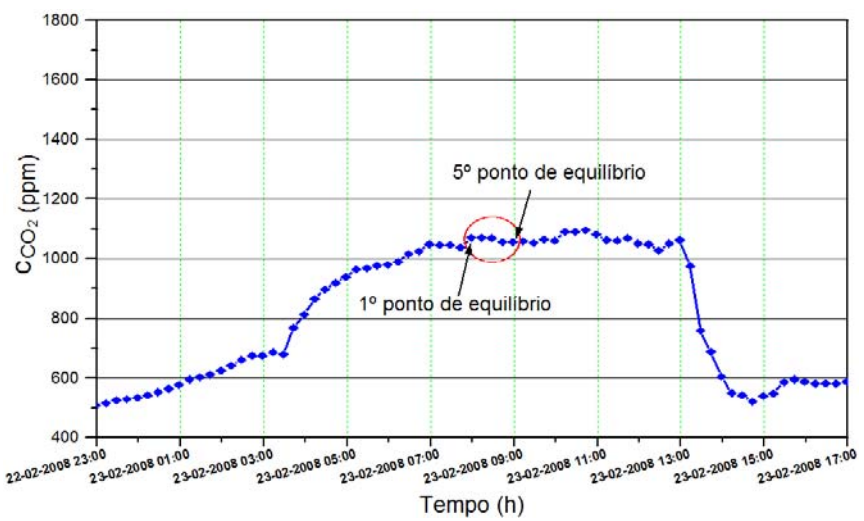


Figura 6.30 – Estado estacionário no quarto B - 23 de Fevereiro

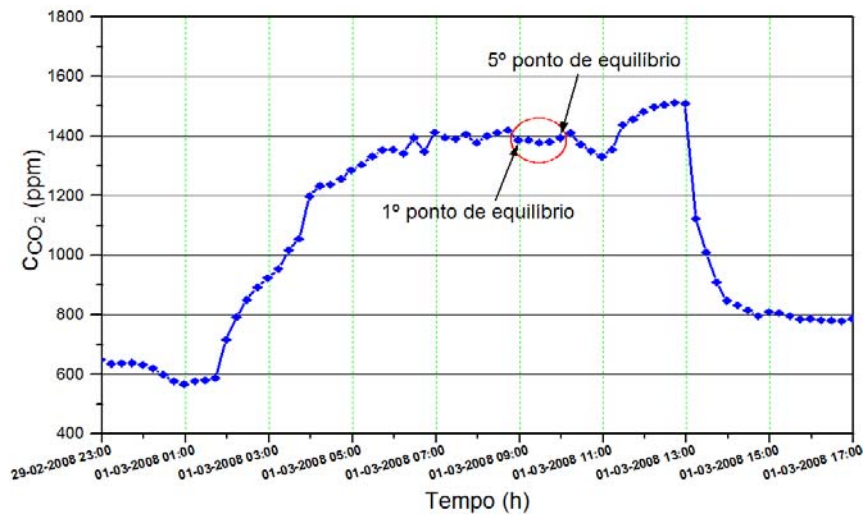


Figura 6.31 – Estado estacionário no quarto B - 1 de Março

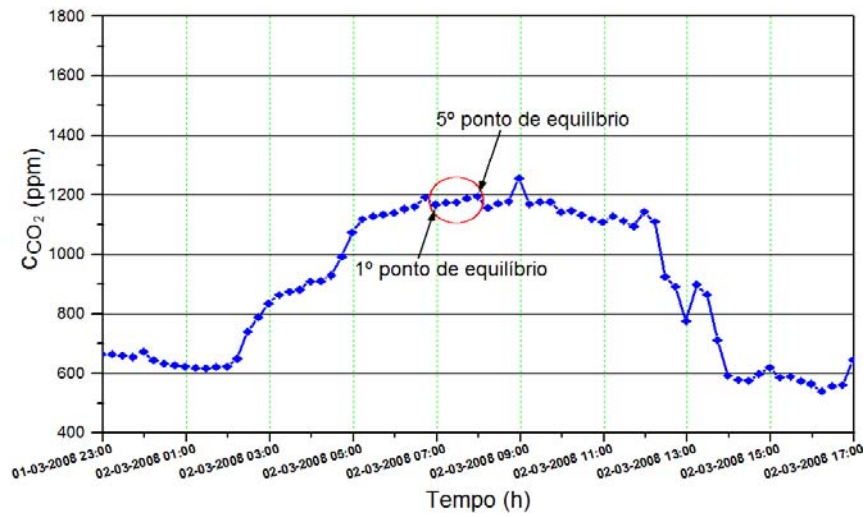


Figura 6.32 – Estado estacionário no quarto B - 2 de Março

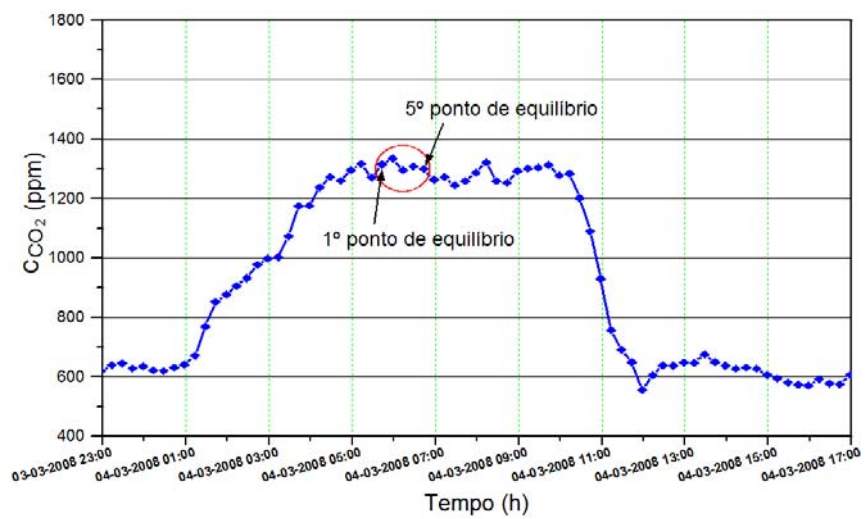


Figura 6.33 – Estado estacionário no quarto B - 4 de Março

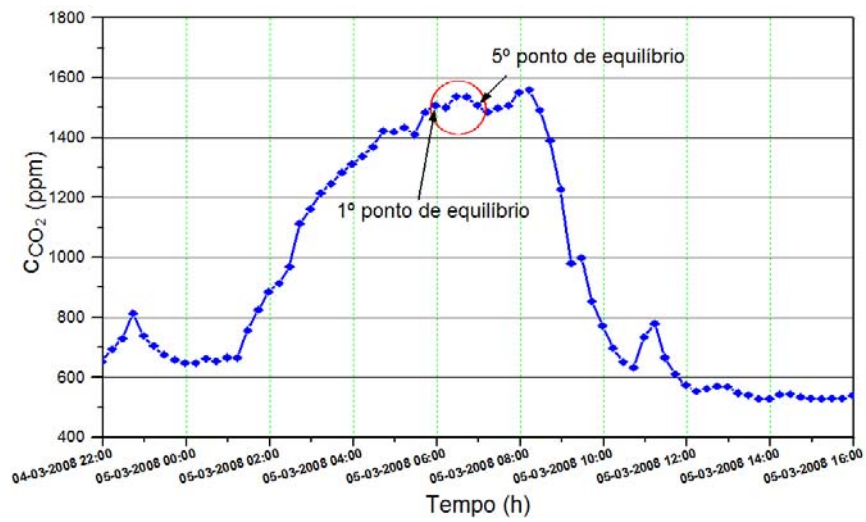


Figura 6.34 – Estado estacionário no quarto B - 5 de Março

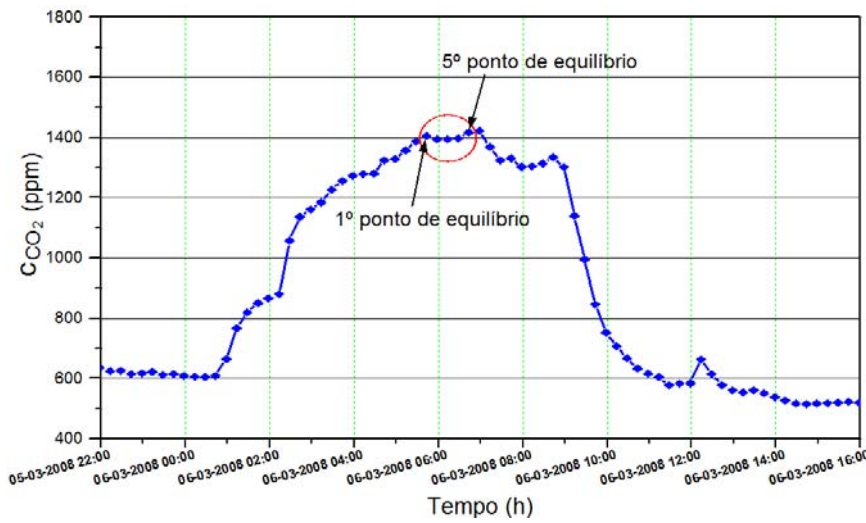


Figura 6.35 – Estado estacionário no quarto B - 6 de Março

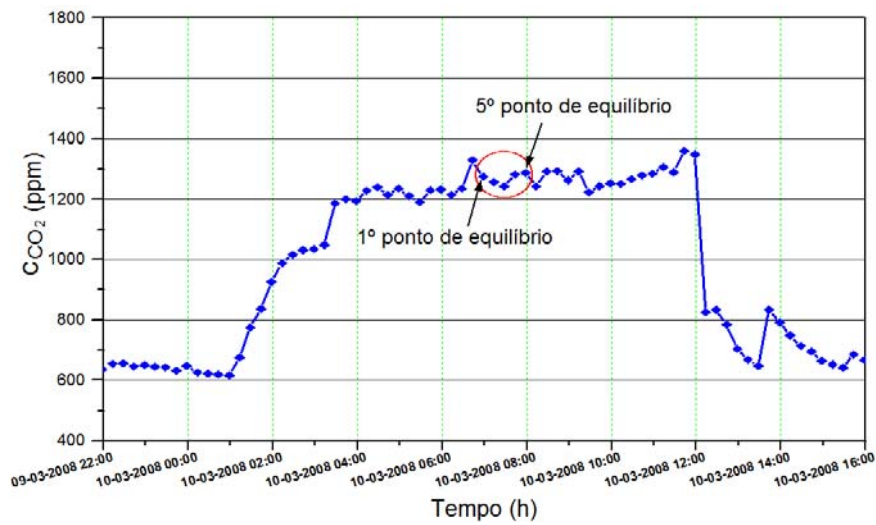


Figura 6.36 – Estado estacionário no quarto B - 10 de Março

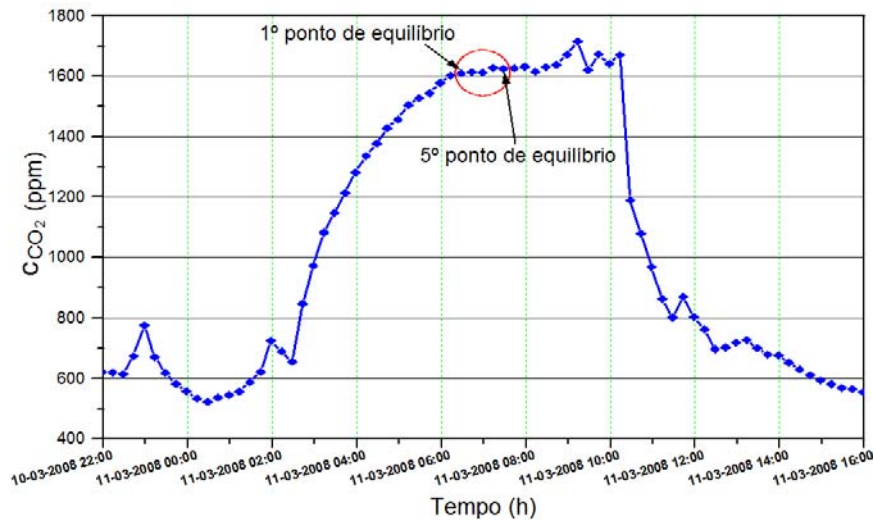


Figura 6.37 – Estado estacionário no quarto B - 11 de Março

- **Determinação do número de renovações horárias, R_{ph}**

No quadro 6.17 constam, para cada um dos dias analisados, os valores da concentração de CO₂ no equilíbrio, o valor médio correspondente, o valor de R_{ph} calculado pela equação 4.15 e o valor do caudal de ventilação por pessoa, Q_p ($l.s^{-1}$).

Observa-se que o valor R_{ph} está compreendido entre $0,7 h^{-1}$ e $1,5 h^{-1}$. Na figura 6.38 apresentam-se os valores de R_{ph} obtidos pela técnica do equilíbrio sob a forma de gráfico, representando-se a vermelho o valor médio de $1,0 h^{-1}$.

Comparando os valores de R_{ph} obtidos no quarto T e no quarto B embora tendo em atenção que correspondem a diferentes períodos de medição, verifica-se que os valores de R_{ph} no quarto B são sempre muitos superiores aos do quarto T, principalmente os determinados pela técnica do equilíbrio. Por informação dos ocupantes, foi esclarecido que enquanto a porta do quarto T permanece fechada, a porta do quarto B fica aberta durante a noite e aberta/entreaberta durante o decaimento, permitindo o fluxo de ar entre o quarto e os restantes compartimentos. Este facto implica que o quarto B não pode ser estudado como um compartimento fechado e que a renovação do ar não é assegurada unicamente por ar exterior, devido aos fluxos de ar de e para os espaços adjacentes.

O erro introduzido no cálculo dos valores de R_{ph} deste compartimento é ainda acrescido no caso da técnica do estado estacionário, pelo facto de se ter considerado como volume efectivo o valor de V do quarto, quando na realidade o espaço confinado corresponde a uma zona alargada da habitação.

Quadro 6.17 – Cálculo de R_{ph} - Quarto B

Tempo (h)	15 de Fev.	17 de Fev.	23 de Fev.	1 de Mar.	2 de Mar.
0	1165	996	1070	1385	1167
0,25	1154	1000	1070	1385	1173
0,5	1148	999	1068	1377	1174
0,75	1134	1009	1056	1380	1187
1	1143	989	1056	1393	1184
C_{CO_2} no equilíbrio (ppm)	1149	999	1064	1384	1179
Q_p ($l.s^{-1}$)	5,7	7,2	6,5	4,3	5,5
R_{ph} (h^{-1})	1,2	1,5	1,3	0,9	1,1

Tempo (h)	4 de Mar.	5 de Mar.	6 de Mar.	10 de Mar.	11 de Mar.
0	1314	1507	1405	1275	1609
0,25	1334	1501	1394	1257	1613
0,5	1295	1537	1394	1244	1612
0,75	1308	1536	1397	1282	1628
1	1299	1508	1417	1288	1624
C_{CO_2} no equilíbrio (ppm)	1310	1518	1401	1269	1617
Q_p ($l.s^{-1}$)	4,6	3,7	4,2	4,9	3,4
R_{ph} (h^{-1})	1,0	0,8	0,9	1,0	0,7

Valor médio de R_{ph}
 $1,0 h^{-1}$

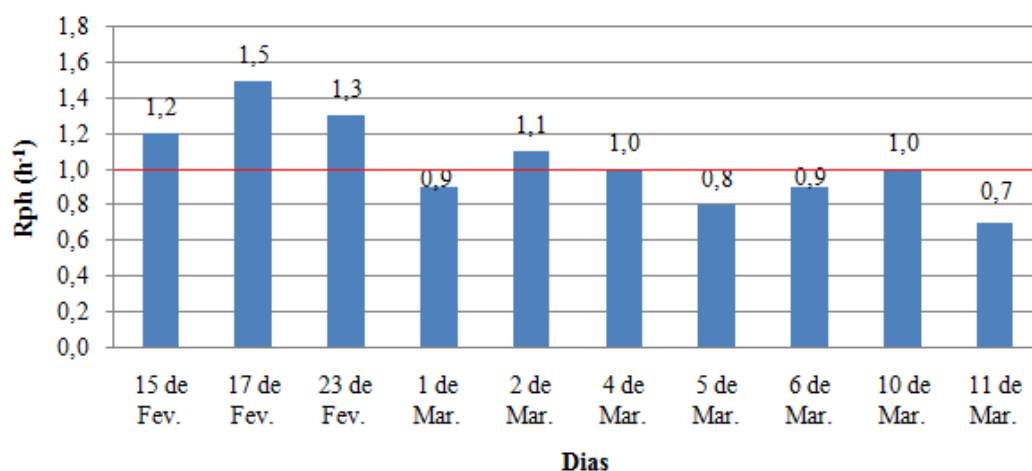


Figura 6.38 – Taxas de renovação horária - Quarto B

6.5 Comparação entre curvas experimentais e curvas calculadas pela técnica da emissão constante no quarto T

Como referido no capítulo 4, usando a técnica da emissão constante é possível conhecer a variação da concentração de CO₂ ao longo do tempo pela equação 4.13. A técnica do estado estacionário resulta da aplicação desta equação para condições em que a concentração de CO₂ é praticamente invariável, ou seja, ao fim de um intervalo de tempo de emissão suficientemente longo para que se possa considerar $t = \infty$.

Com um propósito de verificação, procedeu-se à comparação entre a curva experimental obtida no quarto T com a curva calculada a partir da função $c(t)$, utilizando os mesmos valores de q_{CO_2} e V usados na determinação de R_{ph} pela técnica do estado estacionário e aceitando para a taxa de renovação horária o valor obtido por esta técnica. Seleccionaram-se os dias 1, 3 e 5 de Março cujos valores de R_{ph} obtidos pela técnica do equilíbrio são respectivamente 0,3 h⁻¹, 0,4 h⁻¹ e 0,6 h⁻¹. Utilizando estes valores de R_{ph} , o volume efectivo de 42 m³, a concentração CO₂ no exterior de 425 ppm e o caudal volúmico de emissão de CO₂ de $4,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, traçaram-se as curvas para os dias 1, 3 e 5 de Março, que correspondem às funções seguintes:

- dia 1 de Março:

$$c(t) = 425 + \frac{4,0 \times 3600}{0,3 \times 42} - \left(425 - 500 + \frac{4,0 \times 3600}{0,3 \times 42} \right) e^{(-0,3t)}$$

- dia 3 de Março:

$$c(t) = 425 + \frac{4,0 \times 3600}{0,4 \times 42} - \left(425 - 425 + \frac{4,0 \times 3600}{0,4 \times 42} \right) e^{(-0,4t)}$$

- dia 5 de Março:

$$c(t) = 425 + \frac{4,0 \times 3600}{0,6 \times 42} - \left(425 - 500 + \frac{4,0 \times 3600}{0,6 \times 42} \right) e^{(-0,6t)}$$

As curvas obtidas estão representadas nas figuras 6.39 a 6.41:

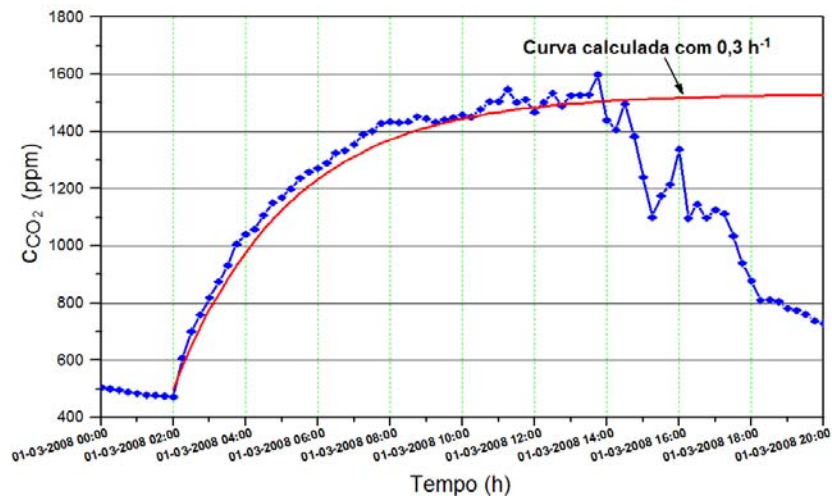


Figura 6.39 – Comparação entre a curva experimental e a curva calculada - 1 de Março - Quarto T

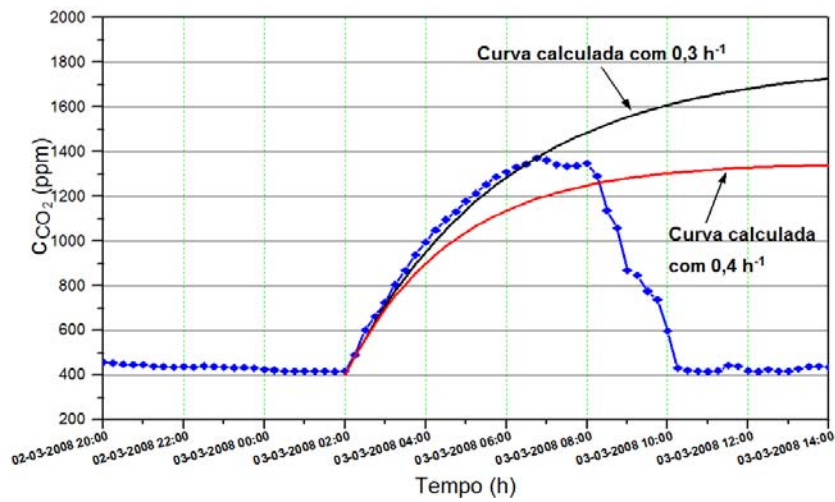


Figura 6.40 – Comparação entre a curva experimental e a curva calculada - 3 de Março - Quarto T

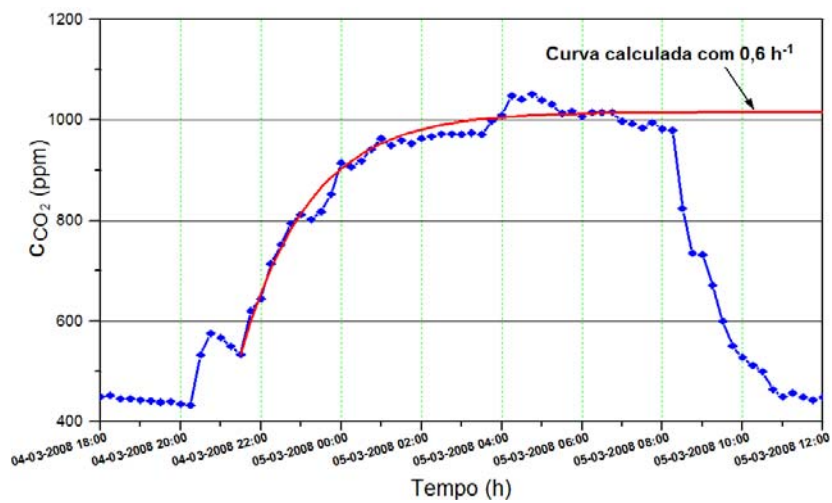


Figura 6.41 – Comparação entre a curva experimental e a curva calculada - 5 de Março - Quarto T

Da observação das figuras verifica-se que nos dias 1 e 5 de Março, há uma excelente concordância entre as curvas calculadas e os valores obtidos experimentalmente. No dia 3 de Março verifica-se que a curva calculada que melhor se ajusta aos valores experimentais corresponde a $0,3 \text{ h}^{-1}$, e não a $0,4 \text{ h}^{-1}$, valor de R_{ph} calculado pela técnica do estado estacionário. Observando a curva de crescimento da concentração de CO_2 constata-se que o patamar dos valores experimentais em que se considera atingido o equilíbrio ocorre demasiado cedo. Este facto pode ser devido a alterações nas condições atmosféricas ou na taxa de produção de CO_2 durante o sono.

Na continuação da análise anterior, apresentam-se na figura 6.42 as curvas da variação da concentração de dióxido de carbono em 10 dias diferentes, a partir dos valores experimentais obtidos. Foram seleccionados dias em que a evolução das curvas é semelhante, excluindo-se aqueles em que o equilíbrio é atingido muito rapidamente ou em que esse equilíbrio ficou muito longe de ser alcançado. Traçaram-se as curvas calculadas com os valores $0,25 \text{ h}^{-1}$, $0,27 \text{ h}^{-1}$ e $0,30 \text{ h}^{-1}$, considerados os mais representativos da taxa de renovação de ar para os 10 dias escolhidos.

Representa-se ainda a curva correspondente a $0,6 \text{ h}^{-1}$, valor mínimo de referência do RCCTE para a renovação do ar nas fracções autónomas dos edifícios de habitação como garantia da qualidade do ar interior.

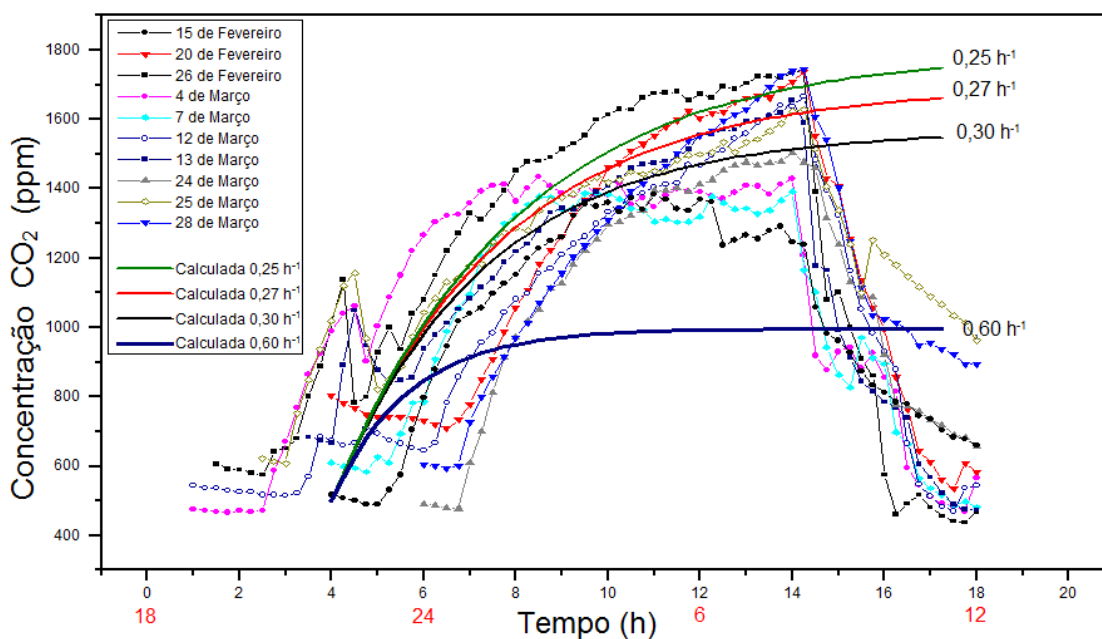


Figura 6.42 – Relação entre curvas experimentais e curvas calculadas para diferentes valores de R_{ph}

6.6 Estimativa da taxa de renovação horária do quarto B utilizando curvas calculadas pela técnica da emissão constante

Apesar de, como já foi referido, não se pretender alterar os hábitos dos moradores durante as medições, foi solicitado que para efeitos de experimentação, e apenas durante alguns dias, a porta do quarto B ficasse fechada enquanto dormiam, o que ocorreu nos dias 25, 27, 28, 29 e 30 de Março. Contudo, esta modificação nas condições experimentais introduziu um outro inconveniente: pela análise dos valores de concentração de CO₂ durante aqueles dias verificou-se que em três deles o valor dessa concentração ultrapassa o alcance programado do aparelho de medida. Nesses intervalos de tempo o valor registado pelo aparelho é constante e igual ao alcance, 2500 ppm. Na impossibilidade de aplicar a técnica do estado estacionário, recorreu-se ao traçado da curva calculada que melhor se ajustava à curva experimental com o propósito de estimar os valores de concentração de CO₂ atingidos no compartimento durante a permanência dos dois ocupantes. Foram seleccionados para análise dois dos dias em que esta situação ocorreu, 25 e 30 de Março.

Na figura 6.43 estão representados os valores experimentais no intervalo de tempo entre as 22.00 h do dia 24 e as 16.00 h do dia 25. Verifica-se a ocorrência de uma diminuição pontual no teor de CO₂ aproximadamente às 3:45 h, pelo que se assumiu que a permanência conjunta dos dois ocupantes se deu a partir desse momento e terminou às 12.00 h quando se inicia o decaimento.

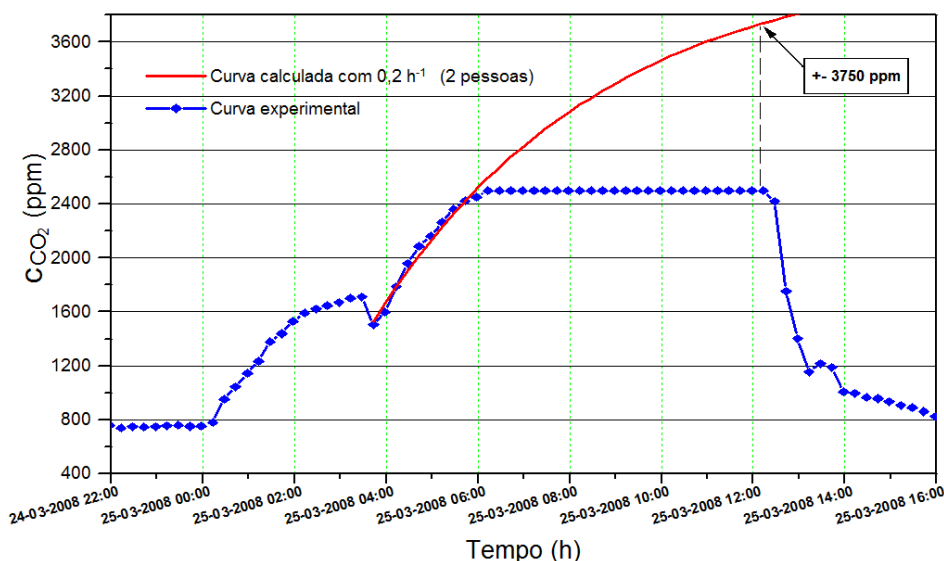


Figura 6.43 – Extrapolação da concentração de CO₂ -
25 de Março - Quarto B

A curva que melhor se ajusta aos valores experimentais corresponde a uma renovação horária de apenas $0,2 \text{ h}^{-1}$. Por extrapolação, pode concluir-se que, ao fim de cerca de 8 horas de permanência dos dois ocupantes no quarto com a porta, janelas e estores fechados, a concentração de dióxido de carbono no ar terá sido superior a 3700 ppm.

Na figura 6.44 estão representados os valores experimentais entre as 3.00 h e as 16.00 h do dia 30 de Março. Verifica-se que aproximadamente às 4:45 h, se inicia o crescimento do teor de CO_2 que terá igualado o alcance do aparelho de medida após 3 horas de permanência dos dois ocupantes. O decaimento ocorre a partir das 12:30 h.

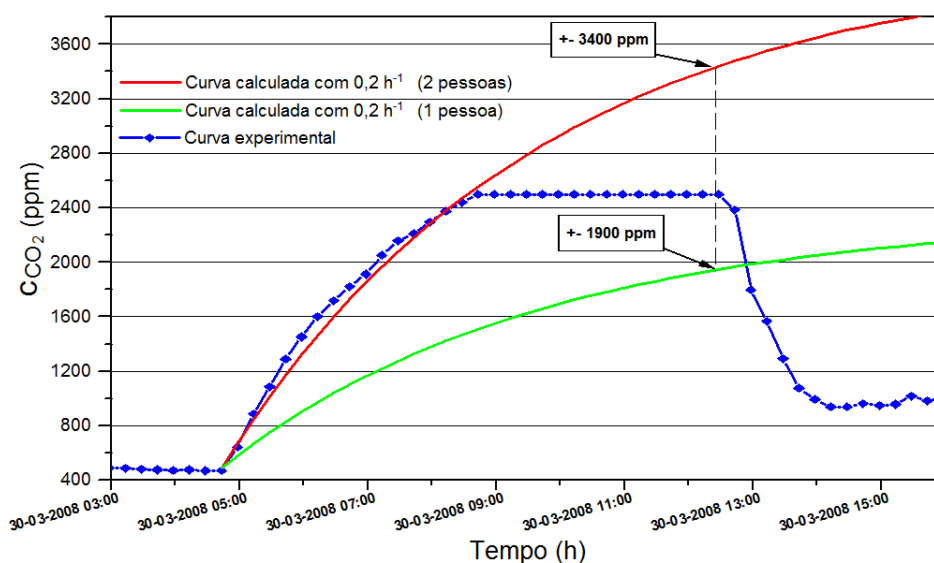


Figura 6.44 – Extrapolação da concentração de CO_2 - 30 de Março - Quarto B

De modo idêntico ao caso anterior, o traçado da curva que se melhor se ajusta aos valores experimentais corresponde a $0,2 \text{ h}^{-1}$. Por extrapolação, obtém-se o valor de 3400 ppm ao fim de aproximadamente 8 horas de permanência.

Representa-se também a curva calculada com o mesmo valor de R_{ph} para a situação de um único ocupante dormir no quarto. Verifica-se que o valor atingido ao fim de 8 horas de permanência seria aproximadamente 1900 ppm.

Nos dois dias analisados com a porta fechada, a estimativa da taxa de renovação horária no quarto B é aproximadamente $0,2 \text{ h}^{-1}$.

6.7 Conclusões sobre a determinação da taxa de renovação horária efectiva

A comparação dos valores de R_{ph} obtidos pela técnica do decaimento e pela técnica do estado estacionário para o quarto T permite concluir que são razoavelmente concordantes.

Nos intervalos de tempo analisados, os valores de R_{ph} determinados pela técnica do decaimento no quarto T variam entre 0,2 e 0,3 h^{-1} , com o valor médio de 0,3 h^{-1} . Pela técnica do estado estacionário, as taxas de ventilação do quarto T durante a noite variam entre 0,3 e 0,6 h^{-1} com o valor médio de 0,4 h^{-1} .

No quarto B, a aplicação das curvas calculadas pela técnica da emissão constante nos dias em que porta é fechada durante a noite permite estimar uma taxa de renovação horária de aproximadamente 0,2 h^{-1} , valor bastante inferior aos valores obtidos para os dias em que a porta permanece aberta. Verificou-se que com a janela e a porta fechada a concentração de CO_2 pode atingir valores muito elevados (3500 ppm) ao fim de algumas horas de permanência no espaço dos dois ocupantes.

6.8 Relação entre a concentração interior de CO_2 e os níveis de qualidade do ar interior

Como foi descrito no capítulo 3, em espaços fechados, com ocupação sedentária e nos quais a fonte poluente é exclusivamente o metabolismo humano, pode ser estabelecida uma correlação entre a concentração de CO_2 no espaço interior e o índice de aceitabilidade do espaço em termos de odor dos bioefluentes. Após a determinação das taxas de renovação horária, R_{ph} , pretende-se agora abordar esta outra vertente da relação entre os valores experimentais das concentrações interiores de CO_2 e a qualidade do ar interior.

- **Análise da concentração de dióxido de carbono nos quartos durante a ocupação nocturna**

Os valores da concentração interior de CO_2 analisados correspondem à semana de 1 a 7 de Março, durante a qual ocorreu a ocupação habitual, o quarto T com um só ocupante e o quarto B com duas pessoas.

A temperatura exterior média correspondente a esta semana foi de 13,0°C. A temperatura interior média no quarto T foi de 18,1°C e no quarto B de 19,3°C.

Tendo em conta que se pretende avaliar o impacto da concentração de CO₂ na percepção que os ocupantes têm da QAI, foram seleccionados intervalos de tempo em que a ocupação dos compartimentos é aproximadamente contínua. No quarto B, o período de permanência inicia-se no instante em que um dos ocupantes entra no quarto e termina no instante em que o último ocupante sai e o espaço fica vazio.

Nos quadros 6.17 e 6.18 apresentam-se os valores mínimos e máximos da concentração de CO₂ correspondentes ao intervalo de tempo de ocupação, para o quarto T e para o quarto B respectivamente. Salienta-se que os valores mínimos referem-se à concentração de CO₂ registada no início da ocupação do compartimento e não ao valor mínimo absoluto diário, o qual normalmente ocorre durante o arejamento com a abertura da janela.

Regista-se também o tempo de permanência dos ocupantes em cada uma das datas.

Quadro 6.18 – Valores mínimos, máximos e médios de concentração de CO₂ (ppm) ao longo de uma semana - Quarto T

	1 Mar	2 Mar	3 Mar	4 Mar	5 Mar	6 Mar	7 Mar
	Sábado	Domingo	Segunda-Feira	Terça-Feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira
Mínimo	472	559	428	473	433	453	584
Máximo	1599	2121	1371	1436	1051	1234	1392
Permanência (h)	15	16,25	6	11,5	12	9,25	9,25

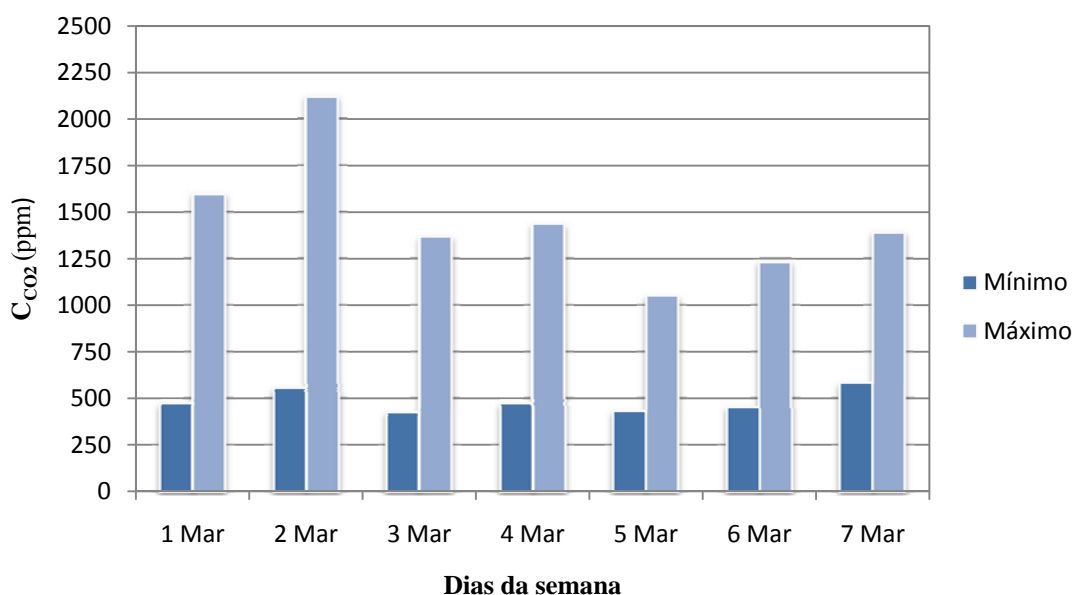


Figura 6.45 – Concentrações de CO₂ no quarto T durante a permanência do ocupante

Quadro 6.19 – Valores mínimos, máximos e médios de concentração de CO₂ (ppm) ao longo de uma semana - Quarto B

	1 Mar	2 Mar	3 Mar	4 Mar	5 Mar	6 Mar	7 Mar
	Sábado	Domingo	Segunda-Feira	Terça-Feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira
Mínimo	588	623	601	620	665	608	546
Máximo	1511	1255	1681	1334	1559	1422	1342
Permanência (h)	11,25	10	10,5	9,75	7,25	8,25	11,5

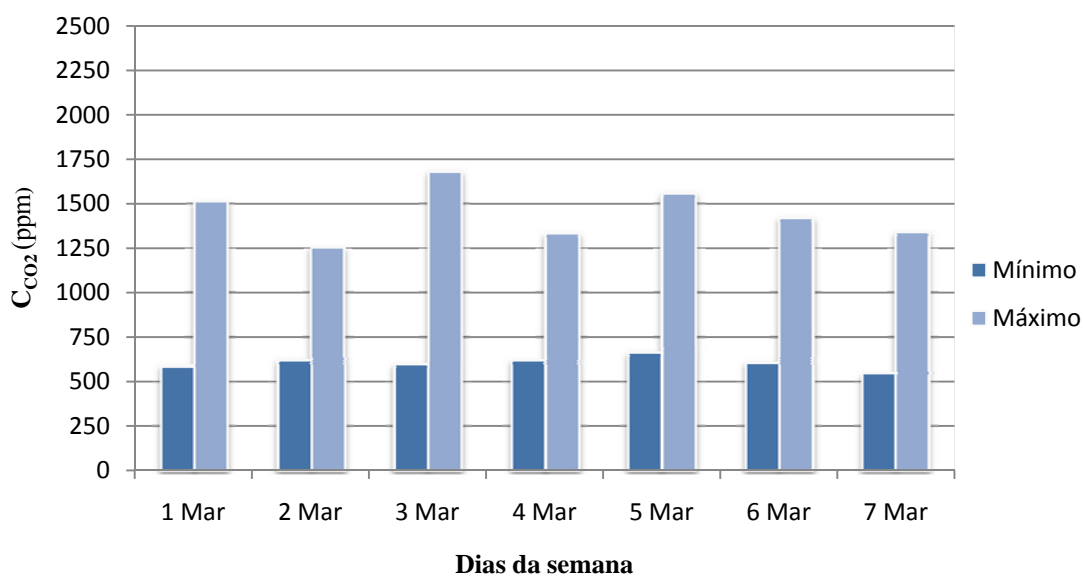


Figura 6.46 – Concentrações de CO₂ no quarto B durante a permanência dos ocupantes

A análise dos dados permite constatar os seguintes factos:

- no quarto T os valores mínimos da concentração de CO₂, que correspondem ao início da ocupação do compartimento, são geralmente inferiores aos verificados no quarto B; os primeiros variam entre 418 ppm e 584 ppm e os registados no quarto B variam entre 546 ppm e 665 ppm. Este facto pode ser explicado pela abertura regular da janela no quarto T durante o período de desocupação do quarto, procedimento que não é geralmente seguido no quarto B. O arejamento do quarto T permite um decaimento mais acentuado das concentrações de CO₂, ficando os valores mínimos absolutos diários próximos dos do ar exterior.

- as concentrações máximas de CO₂ atingidas no quarto T durante a semana variam entre 1051 e 2121 ppm e no quarto B entre 1255 ppm e 1681 ppm. Constatase que em ambos os quartos a concentração de CO₂ atinge valores superiores a 1000 ppm correspondente ao valor máximo de referência definido pelo RSECE para o interior dos edifícios. Na generalidade dos dias é excedido o valor de 1100 ppm, recomendado pela ASHRAE (considerando uma concentração exterior igual a 400 ppm).

É importante salientar que os valores máximos no quarto B que constam no quadro 6.19 foram registados durante uma semana em que a porta permaneceu aberta durante a noite, permitindo um fluxo de ar de e para os compartimentos adjacentes.

Nos dias em que as medições decorreram com a porta fechada durante a noite, foram atingidos valores de concentração de CO₂ superiores a 2200 ppm. A abordagem desta situação, permitiu estimar valores superiores a 3500 ppm após 6 horas de ocupação ininterrupta por duas pessoas a dormir com a porta e a janela fechadas.

Capítulo 7

Conclusões

O presente trabalho teve como objectivo principal a determinação experimental de taxas de renovação horária em quartos de dormir pelo método do gás traçador. Recorreu-se à técnica do decaimento e à técnica do estado estacionário, utilizando como gás traçador o dióxido de carbono produzido pelo metabolismo dos ocupantes. A aplicação de ambas as técnicas justifica-se com facto de se pretender avaliar qual delas corresponde a uma metodologia mais adequada a este caso de estudo, tendo em conta que o processo de medições decorreu sem introdução de modificações significativas nos hábitos dos moradores. Um outro objectivo deste estudo consistiu na utilização da concentração do dióxido de carbono nos quartos de dormir como indicador dos níveis de qualidade do ar interior.

Tendo sido alcançados os objectivos propostos, apresentam-se nesta secção, de um modo sintético, as conclusões finais deste estudo.

- **Limitações da aplicação da técnica do decaimento e da técnica do estado estacionário ao caso de estudo**

Registam-se, em seguida, algumas considerações sobre as limitações das duas técnicas utilizadas, salientando-se que dizem respeito à aplicação específica ao caso de estudo, uma vez que no capítulo 4 foram abordadas as limitações gerais do método do gás traçador, decorrentes de não se verificarem na prática todos os pressupostos teóricos.

Relativamente à técnica do decaimento, as principais circunstâncias condicionantes da sua aplicação foram as seguintes:

- a saída dos dois ocupantes do quarto B não é normalmente simultânea e por este motivo, quando o quarto fica desocupado já ocorreu um decaimento na concentração de CO₂ durante um intervalo de tempo, maior ou menor consoante os dias. Contudo, verifica-se que, na generalidade dos dias a concentração de CO₂ no instante em que o

quarto fica desocupado é ainda suficientemente alta para se poder considerá-lo como instante inicial do decaimento.

- o facto de a porta permanecer entreaberta/aberta durante o decaimento no quarto B implica que a renovação do ar deste quarto não é assegurada unicamente por ar exterior. Os valores de R_{ph} determinados nestas condições experimentais são provavelmente superiores aos que seriam obtidos com a porta fechada.

No que diz respeito à técnica do estado estacionário, e atendendo a que a sua correcta aplicação depende da ocorrência efectiva de um estado de equilíbrio durante uma emissão constante do gás traçador, registaram-se os seguintes factos:

- em muitos dias o período de sono do(s) ocupante(s) não se prolonga por tempo suficiente para ser obtido o estado estacionário, facto que está em consonância com os baixos valores obtidos para a taxa de renovação horária. Conclui-se que a utilização desta técnica será mais adequada em compartimentos cujos valores de R_{ph} sejam previsivelmente mais elevados, implicando um menor intervalo de tempo de produção de CO_2 necessário para atingir o estado de equilíbrio.
- os valores de R_{ph} obtidos segundo esta técnica dependem do valor adoptado para a taxa de produção de CO_2 dos ocupantes e desta se manter constante durante o sono, o que não é provável que aconteça.

Relativamente à aplicação da técnica do estado estacionário ao quarto B, constatou-se que durante a noite os ocupantes mantinham a porta aberta, permitindo o fluxo de ar entre os restantes compartimentos e o quarto. Por este motivo, os valores obtidos pela técnica do estado estacionário para as taxas de ventilação no quarto B, não podem ser considerados válidos uma vez que não se verificam na prática os pressupostos admitidos.

Pelo anteriormente exposto, pode concluir-se que na determinação de taxas de renovação horária de quartos de dormir, utilizando como gás traçador o CO_2 produzido pelos ocupantes, o método do decaimento será mais adequado por apresentar uma metodologia menos condicionante.

Ainda no âmbito da metodologia utilizada, assinala-se a facilidade de utilização dos detectores de CO_2 , por absorção não-dispersiva de infravermelhos, que possibilitam a leitura e registo das concentrações daquele gás durante longos períodos de tempo com necessidades muito reduzidas de qualquer tipo de intervenção dos ocupantes dos espaços. Estes aparelhos representam uma boa opção para estudos dos níveis de qualidade de ar realizados durante longos períodos de tempo.

- **Determinação das taxas de renovação horária efectiva dos quartos de dormir**

Tal como sucede na maioria das habitações em edifícios multifamiliares construídos em Portugal nas duas últimas décadas, nos compartimentos em estudo não existem dispositivos de entrada permanente de ar nas fachadas, nem grelhas de passagem de ar interior. Deste modo, a ventilação dos quartos quando as janelas e as portas se encontram fechadas faz-se unicamente por infiltrações através das caixilharias, das caixas de estore e de outras frinchas na envolvente e nas portas divisórias interiores. Nos quadros 7.1 e 7.2 apresenta-se um resumo dos valores de R_{ph} obtidos na campanha de medições efectuada.

Quadro 7.1 – Valores R_{ph} do quarto T

Técnica	Período de análise	Valor	R_{ph} (h^{-1})
Decaimento	6 dias	Mínimo e máximo	0,2 - 0,3
		Médio	0,3
Estado estacionário	10 dias	Mínimo e máximo	0,3 - 0,6
		Médio	0,4

Quadro 7.2 – Valores de R_{ph} do quarto B

Técnica	Período de análise	Valor	R_{ph} (h^{-1})
Decaimento	7 dias	Mínimo e máximo	0,4 - 0,8
		Médio	0,6
Estado estacionário	10 dias	Mínimo e máximo	0,7 - 1,5 (*)
		Médio	1,0 (*)
Estimativa	2 dias	Mínimo e máximo	0,2- 0,2
		Médio	0,2

(*) valor invalidado por deficiência do método

Os valores da taxa de renovação horária efectiva do quarto T determinados pela técnica do decaimento variam entre 0,2 e 0,3 h^{-1} , com o valor médio de 0,3 h^{-1} , nos intervalos de tempo estudados. Pela técnica do estado estacionário, as taxas de ventilação do quarto T durante a noite variam entre 0,3 e 0,6 h^{-1} com o valor médio de 0,4 h^{-1} .

No quarto B, os valores da taxa de renovação horária efectiva determinados pela técnica do decaimento variam entre 0,4 e 0,8 h^{-1} , com o valor médio de 0,6 h^{-1} ; a aplicação das curvas calculadas pela técnica da emissão constante nos dias em que porta permanece fechada durante a noite permite estimar uma taxa de renovação horária de aproximadamente 0,2 h^{-1} .

A taxa de referência mínima, para a renovação do ar nas fracções autónomas dos edifícios de habitação, preconizada pelo RCCTE, é 0,6 h^{-1} pelo que se conclui que os valores de R_{ph}

determinados em ambos os compartimentos são, em média, inferiores ao valor mínimo de referência.

- **A concentração de CO₂ como indicador da QAI**

A concentração de CO₂ pode ser utilizada como indicador da QAI para avaliar os níveis de conforto dos ocupantes quanto aos odores dos bioefluentes e de outros poluentes cuja taxa de produção seja também proporcional ao nível de ocupação do espaço. No entanto, na interpretação dos resultados deve ser tido em conta o facto de muitas substâncias poluidoras dos quartos de dormir serem produzidas a uma taxa que não é proporcional à ocupação do espaço (como é o caso das substâncias emitidas pelos materiais de construção, aparelhos electrónicos e mobiliário, e dos poluentes provenientes do ar exterior), e cuja concentração não pode ser relacionada com a concentração interior de CO₂.

Apresentam-se seguidamente as conclusões da análise dos valores da concentração interior de CO₂, ao longo da semana de 1 a 7 de Março de 2008.

- A concentração máxima de CO₂ registada durante a noite foi:
 - no quarto T com 1 ocupante e a janela e porta fechadas - 2120 ppm
 - no quarto B, com 2 ocupantes, a janela fechada e a porta aberta - 1680 ppm.
 - no quarto B, com 2 ocupantes, a janela e porta fechadas - >2200 ppm (3500ppm).
- Em ambos os quartos, a concentração de CO₂, durante a noite, atinge valores superiores a 1000 ppm, valor definido pelo RSECE como máximo de referência para o interior dos edifícios.
- Na generalidade dos dias é excedido o valor de 1100 ppm, recomendado pela ASHRAE (considerando uma concentração exterior igual a 400 ppm).
- No quarto T, os valores mínimos da concentração de CO₂, que correspondem ao início da ocupação do compartimento, são geralmente inferiores aos verificados no quarto B, facto que pode ser explicado por haver arejamento regular do quarto T, com a abertura da janela durante o período da manhã, procedimento que não é geralmente seguido no quarto B.

Nas figuras 7.1 e 7.2 apresentam-se as curvas de concentração de CO₂ para diferentes valores de R_{ph}, com as quais se pretende simular as condições correspondentes a cada um dos

compartimentos em estudo. Foram utilizados os valores específicos da taxa de emissão metabólica de CO₂ do(s) ocupante(s) e o volume efectivo do espaço, V.

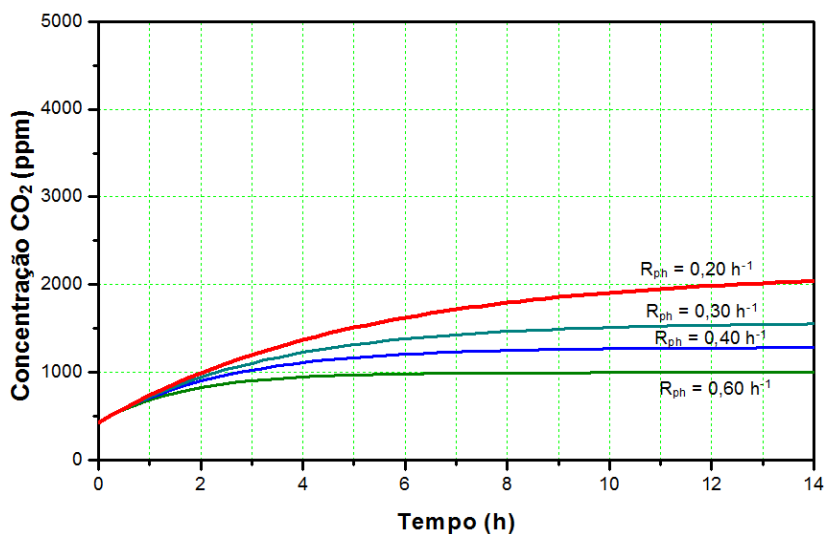


Figura 7.1 – Concentração de CO₂ no quarto T : 1 ocupante, V = 42 m³

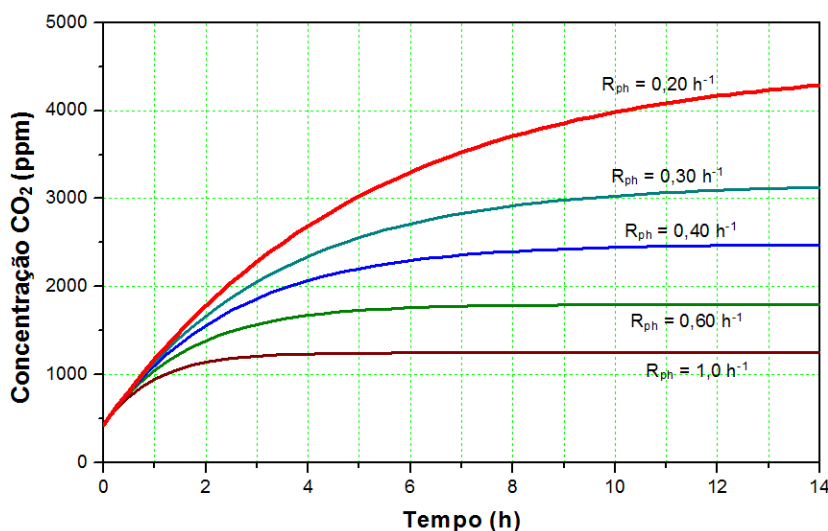


Figura 7.2 – Concentração de CO₂ no quarto B : 2 ocupantes, V = 35 m³

A análise da figura 7.1, relativa ao quarto T, permite concluir que um valor de R_{ph} igual ou superior a $0,6 \text{ h}^{-1}$, (valor mínimo de referência do RCCTE), permite assegurar valores máximos de concentração de CO₂ inferiores a 1000 ppm, durante a noite.

O gráfico referente ao quarto B (2 ocupantes) mostra que é necessário verificar-se uma taxa de ventilação superior a $1,0 \text{ h}^{-1}$ para que a concentração interior de CO₂, durante a noite, se mantenha inferior ao limite recomendado.

Salienta-se que estes valores apenas garantem um nível aceitável de QAI em termos de conforto dos ocupantes relativamente aos odores dos bioefluentes, não se podendo extrapolar

conclusões para outros poluentes que possam estar presentes e cujas taxas de emissão não sejam relacionáveis com a de CO₂.

- **Conclusões finais**

Na interpretação dos resultados deste estudo é importante ter a noção que num compartimento naturalmente ventilado a taxa de renovação do ar pode sofrer grandes variações diárias, quer devido a alterações nas condições atmosféricas, quer devido à abertura das janelas ou das portas. Por este motivo o valor de R_{ph} determinado num intervalo de tempo sob condições definidas é válido apenas para esse mesmo intervalo de tempo, não sendo correcto admitir a sua generalização a outros períodos de tempo, ainda que semelhantes. Pelo mesmo motivo, apesar dos resultados obtidos para as taxas de renovação horária dos dois quartos indicarem a existência de algumas diferenças entre eles, o facto de os valores corresponderem a intervalos de tempo nem sempre coincidentes faz com que não seja seguro estabelecer comparações e tirar conclusões no que respeita aos métodos construtivos e às diferentes exposições ao vento dos dois quartos.

A principal conclusão neste trabalho é a constatação de que nos períodos analisados os dois quartos de dormir beneficiaram de taxas de renovação do ar inferiores aos valores regulamentares e concentrações máximas de CO₂ durante a noite superiores aos limites máximos regulamentares.

Como já foi referido, a redução da qualidade do ar interior num compartimento pode ter consequências negativas no bem-estar das pessoas, afectando-lhes a saúde, o conforto e a produtividade. Para evitar o impacte das taxas de ventilação reduzidas nos quartos de dormir deve ser implementada a disposição da norma NP 1037-1 que prevê a existência de aberturas de admissão de ar permanentes do tipo auto-reguláveis em paredes de fachada dos compartimentos principais, de modo a garantir que ocorre uma ventilação adequada independentemente da abertura das janelas.

Como futuros desenvolvimentos, propõe-se estudar medidas de melhoria das condições de conforto.

Referências bibliográficas

- [1] **Regulamento das características de comportamento térmico de edifícios.** (RCCTE). Decreto-Lei nº80/2006 de 4 de Abril. Diário da República – I Série-A, nº. 67, 2468-2413, 2006.
- [2] **NORMA PORTUGUESA 1037-1 2001.** Ventilação e Evacuação dos Produtos da Combustão dos Locais com Aparelhos a Gás, Parte 1: Edifícios de Habitação. Ventilação Natural. Instituto Português da Qualidade, 2001.
- [3] FREITAS, V.P.; PINTO, M.; GUIMARÃES, A.S. – **Sistemas de ventilação natural/mistos em edifícios de habitação – Implicações construtivas.** Revista Climatização, 52, 2007.
- [4] AWBI, H.B. – **Ventilation.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Pergamon, 2, 157-188, 1998.
- [5] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. (ASHRAE) – **ASHRAE Standard 62-2001, Ventilation for acceptable indoor air quality.** Atlanta (Ga, USA), ASHRAE, 2001.
- [6] SILVA, Fernando S. – **Acções que promovem a ventilação natural.** Ambiente em Edifícios Urbanos, LNEC. Lisboa, 2000.
- [7] SHAW, C.Y. – **Factors affecting the performance of ventilation systems in large buildings.** Institute for Research in Construction. National Research Council of Canada. Ottawa, 1999.
- [8] LIDDAMENT, M. W. – **A guide to energy efficient ventilation.** AIVC, Great Britain, 1996
- [9] **Regulamento de segurança e acções para estruturas de edifícios e pontes** – Decreto-Lei n.º 235/83, de Maio. Porto Editora, 2003.
- [10] VIEGAS, J. C. – **Ventilação natural de edifícios de habitação.** Edifícios 4, LNEC. Lisboa, 2002
- [11] RAATSCHEN, W. *et al.* – **Boundary conditions.** Condensation And Energy Sourcebook. International Energy Agency (IEA). Report Annex XIV, Volume 1, cp. 6, 1991.
- [12] LIDDAMENT, M.W. – **Air infiltration calculation techniques.** Air infiltration and ventilation centre, Bracknell GB, June 1986

- [13] FANGER, P.O. – “**What is IAQ?**” Indoor Air, 16, 328-334, 2006.
- [14] VIEGAS, J. C. – **Contribuição da ventilação natural para a qualidade do ambiente interior em edifícios**. Ambiente em Edifícios Urbanos, LNEC. Lisboa, 2000.
- [15] **Regulamento dos sistemas energéticos de climatização em edifícios (RSECE)**. Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril. Diário da República – I Série-A No. 67, 2418-2468, 2006.
- [16] ARMANDO, Pinto – **Sistemas de climatização e ventilação mecânica**. Ambiente em Edifícios Urbanos, LNEC. Lisboa, 2000.
- [17] **Toxic chemicals in building materials** – An overview for Health Care Organizations. Global Health & Safety Initiative.
- [18] “**Qualidade do ar das habitações portuguesas dá origem a estudo epidemiológico inédito**” - www.cienciapt.info
- [19] PINHO, Fernando Teixeira – **Instalações e serviços industriais**. LEGI. Universidade do Minho.
- [20] LIDDAMENT, M.W. – **A review of ventilation and the quality of ventilation air**. Indoor Air, 10, 193-199, 2000.
- [21] HENRIQUES, F.A. – **Comportamento higrotérmico de edifícios**. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. Almada, 2001.
- [22] **CEN Report 1752: 1998** – Ventilation for Buildings – Design Criteria for the Indoor Environment. Brussels: European Committee for standardization.
- [23] OLESEN, B. W. – **International standards for the indoor environment**. Blackwell, Indoor Air, 14, 18-26, 2004.
- [24] PERSILY, A.K. – **Evaluating building IAQ and ventilation with indoor carbon dioxide**. ASHRAE Transactions, vol. 103, pt. 2, 4072. Atlanta, 1997.
- [25] ASTM. **Standard test method for determining air change in a single zone by means of a tracer gas dilution**, E 741-00. American Society for Testing Materials. West Conshohocken, USA, 2000.
- [26] ROULET, C.; VANDAELE, L. – **Air flow patterns within buildings**. Measurement Techniques. Technical Note 34, Annex 5, IEA-ECBCS, 1991.

- [27] **BS 5925: 1991** – Code of Practice for Ventilation Principles and Design for Natural Ventilation. London: British Standards Institution.
- [28] PERSILY, A.K. – **The relationship between indoor air quality and carbon dioxide**. Indoor Air 96. The 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 961-966, Nagoya, 1996.
- [29] GRIFFITHS, M.; EFTEKHARI, M. – **Control of CO₂ in a naturally ventilated classroom**. Energy and Buildings, Elsevier, 40, 556-560, 2008.
- [30] MATIAS, L.M. – **Conforto térmico em ambientes interiores**. Ambiente em Edifícios Urbanos, LNEC. Lisboa, 2000.
- [31] GIRARD, J. – **Principles of environmental chemistry**. Jones & Bartlett Publishers, 2005.
- [32] Sitio na internet - www.habmigern2003.info
- [33] **WeatherUnderground** - base de dados meteorológica - www.wunderground.com
- [34] PERSILY, A.K. *et al.* – **Survey of ventilation rates in office buildings**. Building Research & Information, 34 (5), 459-466, 2006.
- [35] PAVLOVAS, Vitalijus – **Demand controlled ventilation. A case study for existing swedish multifamily buildings**. Energy and Buildings, Elsevier, 36, 1029-1034, 2004.
- [36] SEKHAR, S.C. – **Enhancement of ventilation performance of a residential split-system air-conditioning unit**. Energy and Buildings, Elsevier, 36, 273-279, 2004.
- [37] KRAUSSE, Birgit *et al.* – **Environmental performance of a naturally ventilated city center library**. Energy and Buildings, Elsevier, 39, 792-801, 2007.
- [38] PERSILY, A.K. – **An indoor air quality performance standard for single-family residential buildings**. ISIAQ, Indoor Air 99 Conference. Proceedings Volume 1. Edinburgh, 1999.
- [39] EMMERICH, S.J; PERSILY, A.K. – **Literature review on CO₂-based demand-controlled ventilation**. ASHRAE Transactions, vol 103, pt 2. Atlanta, 1994.
- [40] CHAU, C.K. *et al.* – **Valuing the health benefits of improving indoor air quality in residences**. Science of the total environment, Elsevier, 394, 25-38, 2008.
- [41] ØIE, Leif *et al.* – **The ventilation rate off 344 Oslo residences**. Indoor Air, 8, 190-196, 1998.

- [42] LAWRENCE, T.M.; BRAUN, J.E. – **A methodology for estimating occupant CO₂ source generation rates from measurements in small commercial buildings**. Building and Environment, Elsevier, 42, 623-639, 2007.
- [43] ENGVALL, K; WICKMAN, P.; NORBACK, D. – **Sick building syndrome and perceived indoor environment in relation to energy saving by reduced ventilation flow during heating season: a 1 year intervention study in dwellings**. Indoor Air 15, 120-126, 2005.
- [44] FANG, L.; CLAUSEN, G.; FANGER, P.O. – **Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality**. Indoor Air, 8, 80-90, 1998.
- [45] MØLHAVE, L.; KRZYZANOWSKI, M. – **The right to healthy indoor air: Stauts by 2002**. Indoor Air, 13, 50-53, 2003.
- [46] LIDDAMENT, M.W.; ORME, M. – **Energy and ventilation**. Pergamon. Applied Thermal Engineering 18, 1101-1109,1998.
- [47] KLEPEIS, N.E. et al. – **The national human activity pattern survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants**. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 11, 3, 231-252, 2001.
- [48] HOOFF, J. – **Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all?** Indoor Air, 18, 182-201, 2008.
- [49] ISO – Moderate thermal environments – **Determination of the PMV and the PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort**. Genève, ISO, 1994. International Standard ISSO 7730/1994.
- [50] ISSO – Ergonomics – **Determination of metabolic heat production**. Genève, ISSO, 1990. International Standard ISSO 8996/1990.
- [52] FEDERAL ENERGY MANAGEMENT PROGRAM – **Demand-controlled ventilation using CO₂ sensors**. Energy Efficiency and Renewable Energy. U.S Department of Energy. 2004.
- [53] NABINGER, S.J.; PERSILY, A.K.; DOIS, W.S. – **A study of ventilation and carbon dioxide in an office building**. ASHRAE Transactions, vol. 100, n° 2, 1994.