



**Universidade de Aveiro** Departamento de Ambiente e Ordenamento  
Ano 2015

**Carla Joana  
Neto Barraca**

**Modelação da qualidade do ar interior em edifícios  
com ventilação natural**





**Carla Joana  
Neto Barraca**

**Modelação da qualidade do ar interior em edifícios  
com ventilação natural**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica da Professora Ana Isabel Miranda, Professora Catedrática do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro e coorientação científica da Doutora Ana Margarida Costa, técnica superior no Instituto do Ambiente e Desenvolvimento.



## **O júri**

Presidente

Professor Doutor António José Barbosa Samagaio  
Professor Associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Vogais

Professor Doutor Nelson Amadeu Dias Martins  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Professora Doutora Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda  
Professora Catedrática do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro



## Agradecimentos

Este trabalho representa a conclusão de mais uma etapa do percurso académico. Contudo, a sua realização não teria sido possível sem o apoio de algumas pessoas.

Agradeço à minha orientadora Professora Ana Isabel Miranda por todo o apoio prestado durante esta etapa e à co-orientadora Doutora Ana Margarida Costa que, de uma forma ou de outra, disponibilizou um pouco do seu tempo para me ajudar.

À minha família e amigos pela motivação e carinho que me deram ao longo desta caminhada.

Quero agradecer à equipa de investigação da Universidade de Aveiro pelos dados e informação fornecidos no âmbito do projeto SINPHONIE, com financiamento da Direção Geral para a Saúde e Consumidores da Comissão Europeia, DG Sanco.

À Escola Secundária José Estêvão por me ter dado a possibilidade de aceder a salas de aulas e compilar informação.

E a todos os que, direta ou indiretamente, tornaram possível a realização deste trabalho.



**Palavras-chave**

qualidade do ar interior, modelação, escolas, material particulado.

**Resumo**

A qualidade do ar interior (QAI) em edifícios é uma preocupação que acompanha o Homem desde há séculos. A qualidade do ar interior nas escolas, em particular, tem vindo a provocar um crescente interesse, dado que o grupo populacional pertence a um grupo etário mais suscetível de ser afetado.

A utilização de ferramentas numéricas de modelação na avaliação da QAI é uma mais valia, pois permite estimar as concentrações dos poluentes no interior dos edifícios.

O principal objetivo deste estudo consiste na avaliação da qualidade do ar interior através da aplicação de uma ferramenta a um caso de estudo. Neste caso de estudo estimou-se a concentração de material particulado (PM10) numa sala de aula da Escola Básica nº 1 da Glória, em Aveiro. Neste âmbito, foi aplicado o modelo INDEX, *Indoor Exposure model*, que possibilita o cálculo de concentrações interiores de poluentes atmosféricos.

Os resultados da aplicação indicam que as concentrações do ar interior são influenciadas pelas concentrações exteriores e pela velocidade do vento. Note-se, contudo, que os valores simulados cumprem os valores legislados na Portaria nº 353-A/2013, de 4 de Dezembro.

Embora os resultados simulados não revelem uma má qualidade do ar interior na sala de aula da Escola Básica nº 1 da Glória, a avaliação de outros poluentes seria um ponto de extrema importância, de forma a verificar se os requisitos da qualidade do ar interior estarão a ser garantidos.



**Keywords**

indoor air quality, modeling, school, particulate matter.

**Abstract**

The indoor air quality (IAQ) in buildings is a concern accompanying mankind for centuries. Particularly in schools, the indoor air quality has been causing growing interest because this population's age group is more susceptible to be affected. The use of numerical modeling tools to evaluate the IAQ is an asset because it permits estimating the concentrations of the pollutants inside buildings. The aim of this study is to evaluate indoor air quality by applying a tool to a case study. In this case study, estimated the concentration of particulate matter (PM10) in *Escola Básica nº 1 da Glória* in Aveiro was estimated. In this context, the model INDEX, Indoor Exposure model, which enables the calculation of indoor concentrations of air pollutants was applied.

Results obtained indicate that indoor air levels are influenced by external concentrations, and wind speed. Note, however, that the simulated values are within the legislated values in *Portaria nº 353-A/2013* of 4<sup>th</sup> December.

Although the simulated results do not show poor indoor air quality in the classroom of the *Escola Básica nº1 da Glória*, the evaluation of other pollutants would be a point of extreme importance in order to verify that the indoor air quality requirements are to be guaranteed.



## Índice

Lista de Abreviaturas.....	V
Lista de Símbolos.....	VI
Capítulo 1 – Introdução.....	1
Capítulo 2 – Qualidade do ar interior.....	5
2.1. Fatores relevantes .....	5
2.2. Quadro legislativo .....	7
Capítulo 3 – Modelação da qualidade do ar interior .....	13
3.1. Modelos de qualidade do ar interior .....	13
3.2. Seleção de um modelo de qualidade do ar interior .....	15
3.3. Modelo INDEX.....	17
Capítulo 4 – Simulação numérica da qualidade do ar interior.....	23
4.1. Caso de estudo.....	23
4.2. Metodologia.....	25
4.3. Condições de aplicação.....	27
4.3.1. Características do edifício .....	28
4.3.2. Condições meteorológicas .....	28
4.3.3. Qualidade do ar exterior .....	29
4.3.4. Concentração de “fundo”.....	30
4.4. Resultados.....	30
4.5. Análise de sensibilidade.....	32
Capítulo 5 – Conclusões .....	37
Referências bibliográficas .....	39

## Índice de Figuras

Figura 1 – Legislação relativa à qualidade do ar interior .....	8
Figura 2 – Esquema do balanço mássico de poluentes .....	14
Figura 3 – Estrutura do modelo Indoor Exposure .....	18
Figura 4 – Fluxograma de identificação das variáveis de entrada e de saída do modelo INDEX.....	21
Figura 5 – Vista aérea da cidade de Aveiro com identificação da Escola Básica nº1 da Glória e da torre meteorológica da UA .....	24
Figura 6 – Localização da sala de aula em estudo .....	24
Figura 7 - Perfil de concentração média diária de PM10, de 9 a 13 de Janeiro de 2012 .....	26
Figura 8 – Valores de velocidade e direção do vento medidos na estação meteorológica da UA para o dia 11 de Janeiro .....	28
Figura 9 – Carrinha usada na campanha de monitorização da qualidade do ar exterior na Escola Básica nº 1 da Glória .....	29
Figura 10 – Valores de concentração de PM10 medidos no ar ambiente na Escola Básica nº 1 da Glória, no âmbito do projeto SINPHONIE .....	29
Figura 11 – Valores de concentração interior de PM10 simulado com base nos dados do projeto SINPHONIE para a sala R1 da Escola Básica nº 1 da Glória .....	31
Figura 12 - Valores de concentração interior de PM10 medidos e simulado com base nos dados do projeto SINPHONIE para a sala R1 da Escola Básica nº 1 da Glória .....	32
Figura 13 – Análise de sensibilidade para a variável velocidade do vento com diferentes aberturas de janelas .....	33
Figura 14 - Análise de sensibilidade para a variável concentração ambiente com diferentes aberturas de janelas.....	34
Figura 15 - Análise de sensibilidade para a variável direção do vento com diferentes aberturas de janelas .....	34

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Limiar de proteção e margem de tolerância para os poluentes físico-químicos segundo a Portaria nº 353-A/2013 .....	9
Tabela 2 -Condições de referência para os poluentes microbiológicos, segundo a Portaria nº 353-A/2013.....	10
Tabela 3 – Valores guia e respetivas médias temporais, segundo a OMS (OMS, 2010).....	11
Tabela 4 – Variáveis incluídas na análise de sensibilidade e respetivos valores .....	27
Tabela 5 – Valores de concentração de “fundo” para os respetivos períodos.....	30

## **Índice de Quadros**

Quadro 1 - Parâmetros físicos, químicos e biológicos associados à QAI .....	5
Quadro 2 – Principais fontes dos agentes e fatores que afetam a qualidade do ar interior .....	6
Quadro 3 – Modelos de qualidade do ar interior .....	16

## Lista de Abreviaturas

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

COMIS - *Conjunction Of Multizone Infiltration Specialists*

COV – Compostos orgânicos voláteis

IAQX - *Indoor Air Quality and Inhalation Exposure*

INDEX – *Indoor Exposure Model*

NW - Noroeste

MT – Margem tolerância

OMS – Organização Mundial de Saúde

PAH - Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos

PM – Material particulado

PM<sub>x</sub> – PM<sub>x</sub> Partículas de diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a X µm (X=2,5; 10)

QAI – Qualidade do ar interior

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

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

REH - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

SCE - Sistema de Certificação Energética dos Edifícios

SED – Síndrome dos edifícios doentes

SINPHONIE - *Schools Indoor Pollution and Health: Observatory Network in Europe*

UA – Universidade de Aveiro

UFC - Unidades Formadoras de Colónias

## **Lista de Símbolos**

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

CH<sub>2</sub>O – Formaldeído

CO – Monóxido de carbono

NO<sub>2</sub> – Dióxido de azoto

O<sub>3</sub> – Ozono

Rn - Radão

## Capítulo 1 – Introdução

Em 1973, com a crise do petróleo, surgem as primeiras preocupações relativas ao consumo energético dos edifícios. Portugal apresenta uma forte dependência energética, sendo vulnerável às crises petrolíferas, económicas e políticas, com oscilações dos preços das matérias. Com o aumento do preço da energia, como consequência da crise, verificou-se uma redução do consumo de energia nos edifícios, sendo estratégico em termos de política energética aumentar o isolamento térmico dos edifícios, reduzindo as infiltrações do ar (Ionescu *et al.*, 2015). As elevadas concentrações de dióxido de carbono são um problema relacionado com os edifícios construídos recentemente, pois devido à redução do consumo de energia, surgiram os edifícios herméticos, edifícios isolados de maneira a impedir a passagem de ar, com consequentes problemas ao nível da saúde e do conforto dos ocupantes, bem como ao nível da produtividade (Jenkins *et al.*, 2009). O isolamento pode influenciar a qualidade do ar interior (QAI), pois as infiltrações de ar contribuem para a ventilação do edifício. Estas políticas afetaram a saúde dos ocupantes dos edifícios, devido ao aumento de humidade e ao desenvolvimento de fungos e bolores no interior destes. O sobreaquecimento no verão ou nas estações intermédias, também está associado à aplicação destas políticas, prejudicando o conforto térmico e o empobrecimento da QAI, devido às baixas taxas de renovação de ar interior (Ionescu *et al.*, 2015).

Os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) podem resolver alguns dos problemas da qualidade do ar interior dos edifícios, porém exigem gastos de energia. A má manutenção dos aparelhos representa um problema de poluição para o edifício (ECA, 2003).

Nas últimas décadas, a qualidade do ar interior tem sido considerada uma das principais causas da degradação da saúde, do desconforto e do baixo desempenho dos ocupantes de estabelecimentos de ensino (EEA, 2007). Segundo a Agência Europeia do Ambiente (2007), tal deve-se ao aumento do tempo de permanência em edifícios, pois, hoje em dia, a população em geral passa cerca de 90% do tempo dentro dos mesmos, especialmente em habitações, locais de trabalho, escolas, espaços públicos e de lazer.

As crianças são o grupo etário mais suscetível de ser afetado pela poluição do ar dado que a taxa de ar que este grupo respira é superior à dos adultos, pelo facto do seu organismo ainda estar em desenvolvimento, tornando-as mais vulneráveis. O número elevado de alunos, relativamente à área da sala de aula, contribui para o aumento da concentração de contaminantes (Almeida *et al.*, 2011). A má qualidade do ar interior deve-se também ao insuficiente fornecimento de ar exterior, agravada pela fraca qualidade de construção e manutenção de edifícios escolares (Pegas *et al.*,

2011). De acordo com Mendell & Heath (2003), devido à falta de financiamento, ainda existem edifícios escolares antigos que não sofreram obras de remodelação e manutenção, apresentando umidade e bolores.

Os ocupantes sujeitos a uma má qualidade do ar interior podem manifestar, a curto prazo, diversos sintomas tais como: dores de cabeça, náuseas, fadiga, sonolência, irritação dos olhos, nariz e garganta. Uma má qualidade do ar interior também afeta a produtividade e o conforto dos ocupantes quando expostos aos poluentes. O “*síndrome dos edifícios doentes*” (SED) define-se, de acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS), como uma situação na qual os ocupantes de um prédio específico apresentam sintomas sem origem determinada e sem a possibilidade de constatação de uma determinada etiologia (Schirmer *et al.*, 2011). Um edifício é considerado doente, se pelo menos 20% dos seus ocupantes apresentarem problemas de saúde ou desconforto, como irritação das mucosas, efeitos neurotóxicos, sintomas respiratórios e cutâneos e alterações dos sentidos, no mínimo durante duas semanas, desaparecendo estes quando o indivíduo se afasta desse edifício. As principais causas da SED poderão dever-se à exposição dos ocupantes a determinados poluentes biológicos, químicos e físicos a níveis não apropriados à saúde (Schirmer *et al.*, 2011).

Porém, não são apenas os edifícios escolares antigos que não sofreram obras de remodelação e manutenção que podem apresentar problemas. Os edifícios escolares que sofreram obras de remodelação e manutenção, ou os que foram construídos recentemente, revelam taxas de emissão de formaldeído superiores às dos edifícios mais antigos, o que se poderá dever a fontes interiores como materiais de construção e mobiliário (Uhde & Salthammer, 2007).

Os processos de limpeza afetam a qualidade do ar interior, devido aos agentes químicos presentes na composição dos produtos (Gallego *et al.*, 2009). Fromme *et al.* (2007) aconselham, para a diminuição de contaminantes, uma limpeza regular e apropriada dos espaços.

Csobod *et al.* (2007) mostram que as escolas da Europa têm frequentemente problemas de QAI, devido à má construção e manutenção de edifícios, limpeza deficiente e fraca ventilação. Vários poluentes podem ser encontrados nas salas de aula, por vezes em concentrações bastante elevadas. Estes autores concluíram também que a poluição nas escolas é complexa e variável e que tem impactes claros sobre a saúde (Csobod *et al.*, 2007). Mendell & Heath (2003) verificaram que a redução da capacidade de concentração dos indivíduos se deve a uma fraca qualidade do ar interior. Lee & Chang (2000) constaram que a inadequada ventilação das salas de aulas e a sobrelotação originava níveis de partículas (PM10) e de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) superiores aos limites legais.

Segundo o projeto SINPHONIE, que tem como objetivo a avaliação da qualidade do ar em 38 instituições de 25 países, entre as quais 3 no Município de Aveiro [1], os valores de referência de PM<sub>2,5</sub> e radão recomendados pela OMS não foram respeitados numa grande parte das salas de aulas monitorizadas, sendo 13% dos alunos expostos a concentrações superiores a 25 µg·m<sup>-3</sup> e mais de 85% a concentrações superiores a 10 µg·m<sup>-3</sup> de PM<sub>2,5</sub> e 50% a um nível superior a 100 Bq·m<sup>-3</sup> de radão (Csobod *et al.*, 2014).

Pegas *et al.* (2011) verificaram que, em 14 escolas básicas de Lisboa, a concentração de CO<sub>2</sub> indicou que a ventilação era inadequada e que as salas de aula se apresentavam sobrelotadas. As concentrações dos microrganismos excediam os valores limite, no interior e no exterior, e os compostos orgânicos voláteis (COV) no interior eram mais elevados que os registados no exterior (Pegas *et al.*, 2011).

Em 2010 foram estudadas duas escolas básicas da cidade de Aveiro, concluindo-se que as concentrações de PM<sub>10</sub>, CO<sub>2</sub>, COVs e microrganismos no interior das salas de aulas foram mais elevadas do que no exterior, verificando-se também que estes poluentes apresentavam valores superiores ao máximo legislado (Silva, 2010).

Em Portugal, um estudo em escolas básicas na cidade do Porto conclui que uma fraca qualidade do ar interior nas escolas pode conduzir ao aumento de sintomas alérgicos e respiratórios nos ocupantes (Fraga *et al.* 2008).

O principal objetivo desta tese consistiu na avaliação da qualidade do ar interior, através da aplicação de uma ferramenta a um caso de estudo, focalizado numa escola de ensino básico.

Inicialmente foi realizada uma pesquisa sobre o tema e feita uma seleção da escola adequada ao estudo. Posteriormente efetuou-se uma análise sobre modelos numéricos de qualidade do ar interior, que permitiu a seleção do modelo a aplicar. Seguidamente fez-se uma recolha dos dados essenciais para a sua aplicação. Por fim, aplicou-se o modelo e realizou-se uma análise de sensibilidade avaliando o efeito de variações de dados de entrada nos resultados finais.

O trabalho desenvolvido é apresentado ao longo de cinco capítulos. No presente capítulo é efetuada uma introdução ao tema em estudo e são também definidos os objetivos do trabalho e indicada a metodologia adotada para a sua realização. O capítulo 2 aborda conceitos básicos essenciais à compreensão da qualidade do ar interior, bem como questões legais. O capítulo 3 apresenta os tipos de modelos numéricos que podem ser usados para estudos de qualidade do ar interior, bem como a descrição de modelos de qualidade do ar interior. No terceiro capítulo é também apresentado o modelo selecionado, INDEX, desenvolvido para calcular a concentração interior de material particulado. A aplicação deste modelo ao caso de estudo é exposta no

capítulo 4 que engloba também a análise dos resultados e análise de sensibilidade. As conclusões finais encontram-se no capítulo 5.

## Capítulo 2 – Qualidade do ar interior

O conceito de qualidade do ar interior não traduz apenas a ausência ou baixas concentrações de poluentes, mas também o nível de conforto, expresso através da temperatura e humidade relativa. Por exemplo, a norma ISO 7730 (2005) apresenta conforto térmico como um estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico que envolve uma pessoa (nem quente nem frio). O conforto térmico no interior dos edifícios é essencial para a saúde e o bem-estar dos ocupantes. O desconforto é um indicador importante para a saúde, pois é o primeiro sintoma que alerta para condições não adequadas às necessidades dos ocupantes dos edifícios (Tirone, 2007).

### 2.1. Fatores relevantes

O conceito da qualidade do ar interior é muito complexo e abrangente e depende de parâmetros físicos, químicos e biológicos. O quadro 1 apresenta os parâmetros físicos, químicos e biológicos associados usualmente à qualidade do ar interior.

**Quadro 1** - Parâmetros físicos, químicos e biológicos associados à QAI

<b>Qualidade do ar interior</b>		
<b>Parâmetros físicos</b>	<b>Parâmetros biológicos</b>	<b>Parâmetros químicos</b>
Temperatura	Fungos	Compostos orgânicos voláteis
Radiação solar	Bactérias	Formaldeído
Humidade relativa	Legionella	Radão
Velocidade do ar		Ozono
Taxa de renovação do ar		Monóxido de carbono
		Dióxido de carbono
		Partículas suspensas no ar

Os poluentes químicos e/ou biológicos podem ser oriundos de fontes internas ou externas. No quadro 2 estão descritos os principais agentes e fatores que afetam a qualidade do ar interior, assim como as suas fontes interiores e exteriores.

**Quadro 2** – Principais fontes dos agentes e fatores que afetam a qualidade do ar interior (APA, 2009)

<b>Fator/Agente</b>	<b>Fonte interior</b>	<b>Fonte exterior</b>
<b>Compostos orgânicos voláteis (Tricloroetileno, benzeno, tolueno, metil etil cetonas, álcoois metacrilatos, acroleína, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, e pesticidas)</b>	Tintas, produtos de limpeza, impressoras, fotocopiadoras, computadores, solventes impermeabilizantes e isolantes derivados de silicone, carpetes, mobiliário, adesivos, calafetagem, inseticidas, herbicidas, produtos de combustão, fumo de tabaco, cosméticos e outros produtos de uso pessoal.	Veículos automóveis; Indústrias.
<b>Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	Utilização de equipamentos a gás ou outros combustíveis em espaços mal ventilados; Ocupantes (respiração humana).	Veículos automóveis; Indústrias.
<b>Fibras Artificiais: fibra de vidro e lã mineral</b>	Isolantes e impermeabilizantes utilizados na construção.	Indústrias; Trabalhos de construção e demolição.
<b>Formaldeído (CH<sub>2</sub>O)</b>	Isolamento de espuma de ureia, madeira contraplacada não selada, madeira prensada, madeira aglomerada, painéis de revestimento de paredes, carpetes, tecidos, colas, adesivos, produtos de combustão (ex. fumo de tabaco).	O formaldeído é quase, exclusivamente, identificado em ambientes interiores.
<b>Fumo do tabaco</b>	Cigarros, charutos.	
<b>Microorganismos e outros contaminantes biológicos</b>	Água estagnada em sistemas AVAC, materiais húmidos, desumidificadores, condensadores das torres de arrefecimento ( <i>chillers</i> ), torres de refrigeração, plantas, animais.	Vegetação e flora microbiana ambiental; Animais; Deposição de resíduos.
<b>Mistura de gases inorgânicos: amoníaco, ácido sulfídrico e dióxido de enxofre</b>	Produtos de limpeza, produtos de combustão e fumo de tabaco.	Indústrias.
<b>Monóxido de carbono (CO)</b>	Fumo de tabaco; Utilização de equipamentos a gás ou outros combustíveis em espaços mal ventilados.	Veículos automóveis.
<b>Dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>)</b>	Produtos de combustão de cozinhas e aquecedores a gás, fumo de tabaco, fumos de soldadura.	Veículos automóveis; Indústrias.
<b>Ozono (O<sub>3</sub>)</b>	Fotocopiadoras, impressoras, ambientadores, descargas elétricas.	Atmosfera – nevoeiro Fotoquímico (o ozono resulta da transformação atmosférica de produtos emitidos pelos processos de combustão).
<b>Partículas</b>	Fumo de tabaco, papel, isolamento de tubagens, resíduos de água, carpetes, filtros AVAC, atividades de limpeza.	Solo; Veículos automóveis; Indústrias; Trabalhos de construção e demolição.
<b>Radão (Rn)</b>	Materiais de construção.	Solo e águas subterrâneas.

Os poluentes provêm de diversas fontes, como indústrias, veículos automóveis, no caso de emissões provocadas pela atividade humana, podendo igualmente provir de meios naturais, como no caso de incêndios florestais.

De modo geral, e desde que a qualidade do ar exterior seja aceitável, pode-se obter uma boa qualidade do ar interior recorrendo a uma adequada ventilação. Se a ventilação for deficientemente feita ou implementada pode causar desconforto, por exemplo, correntes de ar (Fanger, 2006).

A ventilação em edifícios é o processo pelo qual é introduzida uma quantidade de ar novo no interior de uma zona, através de processos naturais, mecânicos ou híbridos.

Nos sistemas de ventilação natural, para a renovação do ar no interior do edifício por ar novo atmosférico, recorre-se às aberturas na envolvente com a área adequada, autocontroladas ou por regulação manual, e aos mecanismos naturais do vento e das diferenças de temperatura que causam o movimento do ar. Devido à modificação das condições exteriores, com as aberturas das portas e janelas, esta tipologia de ventilação proporciona flutuações na temperatura e humidade interior (Etheridge, 2012).

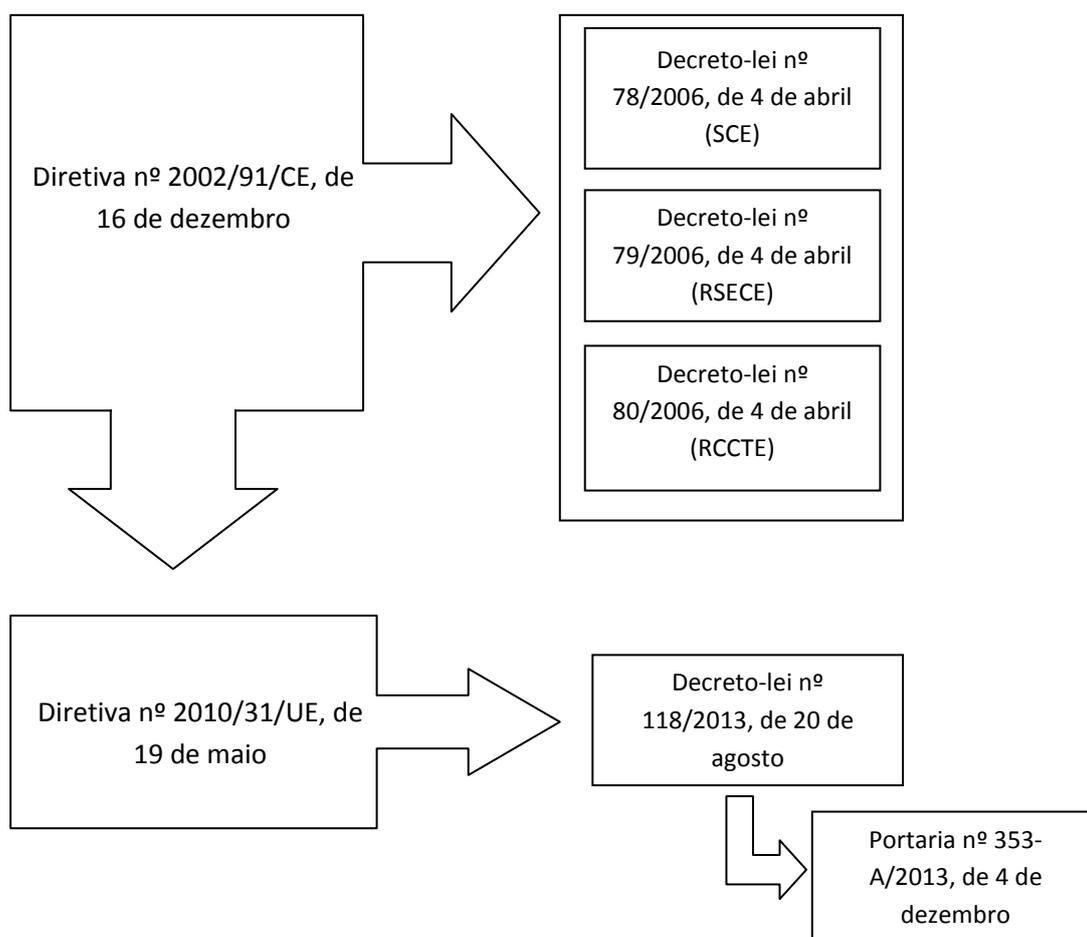
Na ventilação mecânica a renovação do ar é realizada pela sua extração do espaço interior (ar de extração) e pela insuflação de ar exterior ou de ar tratado, utilizando um sistema de condutas e ventiladores (Pereira & Bessa, 2012). Este mecanismo permite a ventilação sem o abrir ou fechar de portas ou janelas. Acarreta, contudo, gastos de energia e exige uma manutenção eficiente do sistema para evitar o crescimento de microrganismos.

Nos sistemas híbridos de ventilação, a renovação do ar interior por ar novo recorre à combinação da ventilação natural, sempre que as condições o permitam e da ventilação mecânica, como forma alternativa ou complementar, sempre que a ventilação natural seja insuficiente.

As entradas não controladas de ar exterior no edifício, através de aberturas não intencionalmente realizadas na envolvente, são designadas por infiltrações. Todas as fendas e fissuras existentes na envolvente de um edifício contribuem para a ocorrência de infiltrações (Pereira & Bessa, 2012).

## **2.2. Quadro legislativo**

Atendendo aos efeitos na saúde associados à contaminação do ar interior houve a necessidade de se criarem algumas respostas legislativas para colmatar o excesso de poluição interior. A figura 1 apresenta um esquema ilustrativo da legislação, mais atual, que inclui aspetos da qualidade do ar interior.



**Figura 1** – Legislação relativa à qualidade do ar interior

A Diretiva 2002/91/CE, transposta pelos Decreto-lei nº 78/2006, Decreto-lei nº 79/2006 e Decreto-lei nº 80/2006, foi reformulada pela Diretiva nº 2010/31/UE, relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios. Posteriormente, a Diretiva nº 2010/31/UE foi transposta para o ordenamento jurídico nacional pelo Decreto-Lei nº 118/2013, de 20 de agosto, aprovando o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). Este Decreto-Lei foi regulamentado por diferentes Portarias, sendo a Portaria nº 353-A/2013, de 4 de dezembro, a que determina os valores mínimos de caudal de ar novo por espaço, assim como os limiares de proteção e as condições de referência para os poluentes do ar interior dos edifícios novos de comércio e serviços, sujeitos a grande intervenção, bem como os existentes e a respetiva metodologia de avaliação.

Os valores limiar de proteção exibem o valor de concentração de um poluente no ar interior que não pode ser ultrapassado para evitar, prevenir ou reduzir os efeitos nocivos na saúde humana. Estes são acompanhados de uma margem de tolerância, expressa como a percentagem em que o limiar de proteção pode ser excedido.

A tabela 1 apresenta resumidamente os valores limiares de proteção para os poluentes físico-químicos e a margem de tolerância.

**Tabela 1** - Limiar de proteção e margem de tolerância para os poluentes físico-químicos segundo a Portaria nº 353-A/2013

Poluentes	Unidade	Limiar de proteção	Margem de tolerância (MT) (%)	
Partículas em suspensão	PM10	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	50	100
	PM2,5	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	25	100
Compostos Orgânicos Voláteis Totais (COV)	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	600	100	
Monóxido de carbono (CO)	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	10	-	
	ppmv	9	-	
Formaldeído (CH <sub>2</sub> O)	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	100	-	
	ppmv	0,08	-	
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	2250	30	
	ppmv	1250	30	
Radão (Rn)	$\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	400	-	

As condições de referência para os parâmetros microbiológicos a considerar são os previstos na tabela 2.

**Tabela 2** -Condições de referência para os poluentes microbiológicos, segundo a Portaria nº 353-A/2013

	<b>Matriz</b>	<b>Unidade</b>	<b>Condições de referência</b>
Bactérias	Ar	UFCm <sup>-3</sup>	Concentração de bactérias totais no interior inferior à concentração no exterior, acrescida de 350 UFCm <sup>-3</sup>
<i>Legionella spp</i>	Água	UFCL <sup>-1</sup>	Concentração inferior a 100 UFCL <sup>-1</sup> , exceto no caso da pesquisa em tanques de torres de arrefecimento em que deve verificar-se uma concentração inferior a 1000 UFCL <sup>-1</sup> .  Ausência de <i>Legionella pneumophila</i>
Fungos	Ar	UFCm <sup>-3</sup>	Concentração de fungos no interior inferior à detetada no exterior

\*UFC – Unidades Formadoras de Colónias

Os valores constantes das tabelas 1 e 2 devem ser conjugados com o seguinte:

- As concentrações em  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  e  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  referem-se à temperatura de 20° C e à pressão de 1 atm (101,325 kPa);
- Os limiares de proteção indicados dizem respeito a uma média de 8 horas;
- As margens de tolerância, previstas são aplicáveis a edifícios existentes e edifícios novos sem sistemas mecânicos de ventilação;
- A análise de radão é obrigatória em edifícios construídos em zonas graníticas, nomeadamente nos distritos de Braga, Vila Real, Porto, Guarda, Viseu e Castelo Branco.

Apesar das concentrações dos diversos poluentes presentes no ar interior de um determinado espaço poderem estar dentro dos limites máximos admissíveis para não constituírem perigo para a saúde dos ocupantes, estes podem demonstrar insatisfação em relação à qualidade do ar interior.

A Organização Mundial de Saúde (OMS) estabelece também valores guia, constituindo uma referência internacional para os efeitos adversos da exposição, a diferentes poluentes, na saúde humana (OMS, 2006). Em 2010, a OMS divulgou os valores guia para a qualidade do ar interior, que se apresentam na tabela 3.

**Tabela 3** – Valores guia e respetivas médias temporais, segundo a OMS (OMS, 2010)

<b>Poluente</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor guia</b>	<b>Média temporal</b>
Dióxido de azoto	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	200	1 hora
		40	1 ano
Formaldeído	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0,1	30 min
Monóxido de carbono	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	100	15 min
		35	1h
		10	8h
		7	24h
Naftaleno	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0,01	1 ano
Radão	$\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	100	-
Tetracloroetileno	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0,25	1 ano

A OMS considera valores guia no ar interior para os poluentes benzeno, monóxido de carbono, formaldeído, naftaleno, dióxido de azoto, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH), radão, tricloroetileno e tetracloroetileno, devido a serem emitidos por fontes interiores associadas a problemas de saúde, podendo atingir concentrações preocupantes. A OMS não estabeleceu valores guia para o benzeno, PAH e tricloroetileno por serem compostos carcinogénios, não existindo nível de exposição seguro.

Os valores-limite europeus e os valores-guia da OMS são similares para os poluentes que apresentam a mesma média temporal.



## **Capítulo 3 – Modelação da qualidade do ar interior**

A modelação da qualidade do ar interior permite calcular as concentrações dos poluentes no interior dos edifícios, bem como estimar a ventilação necessária para manter concentrações adequadas de poluentes.

Nos últimos anos, o desenvolvimento de modelos físicos e matemáticos tem sido promovido pela crescente necessidade da utilização de meios de cálculo que possibilitam conceber e prever as características do escoamento do ar, da distribuição da temperatura, da distribuição da humidade do ar e do transporte de contaminantes em espaços de edifícios ventilados, por convecção natural ou por sistemas mecânicos (Ramos, 1998).

Os modelos de qualidade do ar interior podem ser aplicados como ferramentas de decisão com base nas simulações de concentrações de poluentes ambientais [2].

Existem diferentes tipos de modelos, que se descrevem neste capítulo.

### **3.1. Modelos de qualidade do ar interior**

Os modelos podem classificar-se como modelos empíricos, modelos de balanço de massa e modelos computacionais de dinâmica de fluidos (CFD).

Os modelos empíricos, como o nome indica, são modelos matemáticos baseados no tratamento estatístico de dados experimentais. Estes modelos permitem obter uma primeira aproximação dos caudais ou da velocidade média aplicados a edifícios de uma única zona (Awbi, 2003).

Relativamente aos modelos de balanço de massa, a figura 2 ilustra a conservação de massa de um caso de estudo, considerando um espaço onde se efetuam trocas gasosas com o exterior, que no ambiente interior existe uma fonte poluente e um elemento de purificação do ar e assumindo a possibilidade de absorção ou deposição do poluente nas superfícies interiores ou nas paredes.

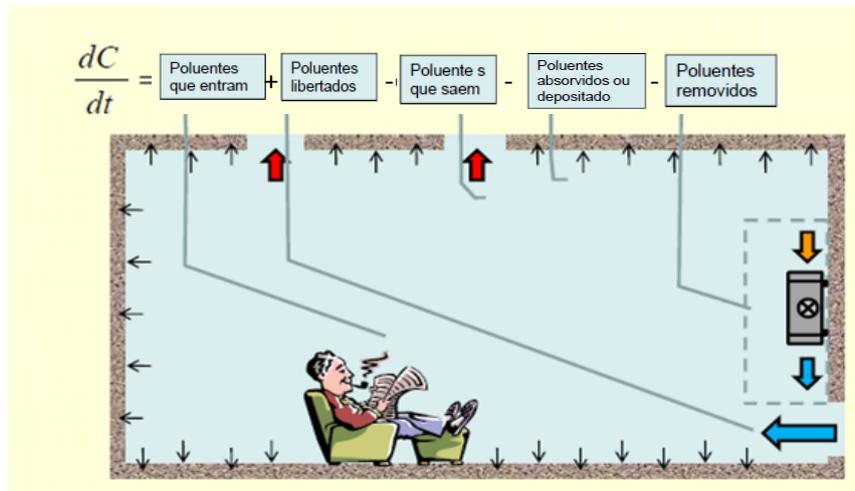


Figura 2 – Esquema do balanço mássico de poluentes (adaptada de Cunha, 2014)

Matematicamente, a equação generalizada do balanço de massa pode ser dada pela equação 1 (Fisk & Almeida, 1998).

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

Onde:

$C_{ed}$  concentração interior média instantânea do poluente ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ );

$t$  tempo (s);

$G$  geração de poluentes no interior do compartimento ( $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$ );

$V$  volume do espaço ( $\text{m}^3$ );

$\lambda_V$  taxa de renovação ( $\text{h}^{-1}$ );

$C_{ext}$  concentração do poluente no exterior ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ );

$v_d$  velocidade de deposição do poluente ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ );

$S$  área da superfície de deposição ( $\text{m}^2$ );

$V_p$  caudal através do purificador de ar ( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ );

$\varepsilon_{ac}$  eficiência do sistema de tratamento de ar.

A equação 1 é concebida para poluentes em estado instacionário, num edifício com uma taxa estável de emissão interior de poluente interior (Fisk & Almeida, 1998).

Os modelos CFD têm por base a resolução das equações de conservação da massa, energia e quantidade do movimento, para obter dados de velocidade, massa e temperatura, sendo possível calcular o conforto térmico, qualidade do ar e ventilação (Awbi, 2003).

Os modelos computacionais de dinâmica dos fluidos têm sido bastante importante para prever o escoamento em compartimentos ventilados, permitindo determinar as taxas de renovação de ar, como também a distribuição da velocidade e pressão do vento, interna e externa, do edifício (Allard, 1998).

Estes modelos podem obter resultados com grande incerteza devido a algumas simplificações realizadas.

Também foram desenvolvidos modelos que incorporam a modelação da exposição, ou seja a previsão da exposição dos ocupantes aos poluentes no ar interior, permitindo a avaliação de eventuais riscos.

### **3.2. Seleção de um modelo de qualidade do ar interior**

Com o objetivo de selecionar um modelo adequado para simular as concentrações interiores de poluentes atmosféricos numa escola de ensino básico foi realizada uma pesquisa. No quadro 3 são apresentados modelos de qualidade do ar interior e respetivas características básicas.

**Quadro 3 – Modelos de qualidade do ar interior**

<b>Modelo</b>	<b>Caraterísticas básicas</b>
<b>Indoor Exposure (INDEX) [3]</b>	Estima concentrações interiores de partículas ou outros poluentes. Modelo balanço de massa.
<b>CONTAM [4]</b>	Calcula: fluxos de ar; concentrações dos contaminantes; exposição dos ocupantes. Modelo CFD.
<b>Indoor Air Quality and Inhalation Exposure (IQAX) [5]</b>	Simula a concentração de poluentes e / ou a exposição pessoal. Modelo CFD.
<b>RISK [6]</b>	Estima a exposição individual a poluentes do ar interior de fontes. Modelo CFD.
<b>Conjunction of Multizone Infiltration Specialists (COMIS) [7]</b>	Calcula fluxos de ar. Modelo CFD.

Sendo um modelo de balanço de massa e tendo em conta as concentrações do ar exterior, o modelo INDEX determina as concentrações interiores de partículas ou outros poluentes. Inclui um módulo determinístico, que estima concentrações interiores e rácios de concentrações interior/exterior, e um módulo probabilístico que estima a distribuição estatística das concentrações no interior. A sua precisão depende da exatidão das concentrações ambientais e da meteorologia; não tem em conta a atividade humana no interior do edifício [3].

O modelo CONTAM permite a simulação multizona do desempenho dos edifícios em termos de qualidade do ar interior [4]. Pode ser aplicado para:

- Determinação de fluxos de ar: cálculo das taxas de ventilação de edifícios e respetiva variação ao longo do tempo, análise da ventilação entre diferentes zonas do edifício, estimativa dos impactes de diferentes estratégias de renovação do ar;
- Determinação da concentração de poluentes: dispersão de poluentes associada aos processos de ventilação, incluindo reações de transformação químicas, adsorção ou libertação de materiais,

filtragem, deposição em superfícies, ou emissão de poluentes através da identificação de fontes específicas;

- Determinação da exposição: previsão da exposição dos ocupantes aos poluentes no ar interior, permitindo a avaliação de eventuais riscos considerando diferentes pressupostos de ocupação, ventilação ou emissão de poluentes.

O modelo IAQX permite calcular concentrações de poluentes e/ou a exposição pessoal em função do tempo. Esta é uma ferramenta de estimativa da qualidade do ar interior composto por cinco programas de simulação, um que realiza simulações multi-zona, e os outros quatro para simulações com propósitos específicos, como modelos para partículas e modelos para previsão das emissões de COVs a partir de materiais de revestimento interior à base de solventes.

O modelo RISK assume uma distribuição homogénea da concentração no interior de cada sala do edifício. Para a modelação da emissão a partir de fontes no interior, o modelo RISK recorre a dois modelos, IAQX e PARAMS [6].

O modelo COMIS simula a infiltração de ar e a ventilação de várias zonas. Pode ser utilizado como um modelo de simulação independente ou associado a programas de simulação térmica, como por exemplo o EnergyPlus [7]. Esta ferramenta possibilita a análise de fenómenos de ventilação, dispersão e migração de poluentes em edifícios [8].

Atendendo aos objetivos do trabalho e tendo em conta as características dos modelos estudados selecionou-se o modelo INDEX, pois para além de ser adequado ao caso específico, é também um modelo de balanço de massa bastante simples e de fácil aplicação.

### **3.3. Modelo INDEX**

O modelo INDEX, tal como referido previamente, inclui um módulo determinístico e um módulo probabilístico. Foi desenvolvido para simular, em particular, as concentrações no interior de partículas em suspensão, contudo pode ser adaptado a outros poluentes.

Apresenta-se na figura 3 a estrutura do modelo em estudo.

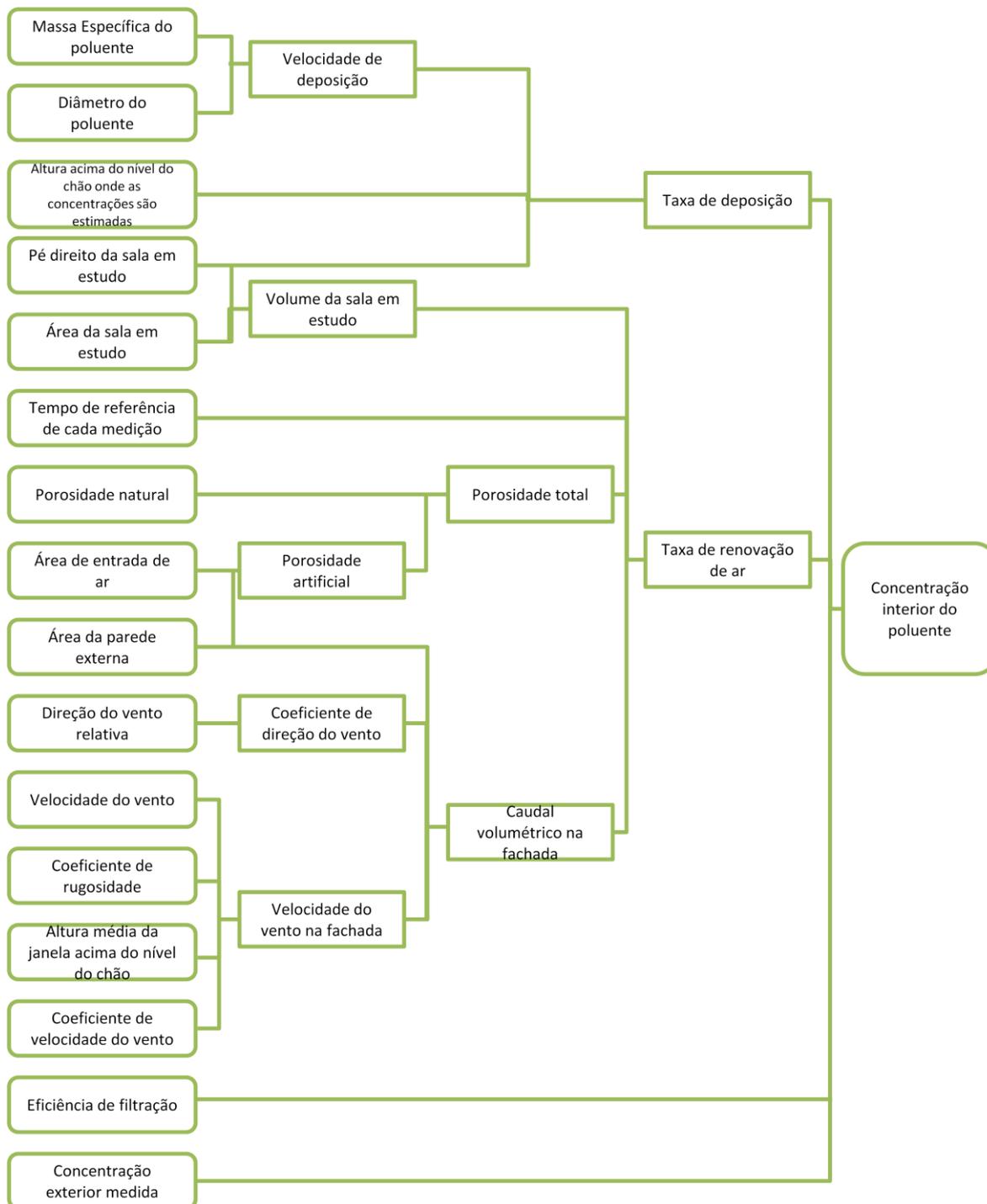


Figura 3 – Estrutura do modelo Indoor Exposure

É um modelo muito simples que calcula a concentração do ar interior com base na equação 2.

$$\text{Concentração interior} = \frac{C_o \times (1-F) \times X}{D_r + X} \quad (2)$$

Onde:

$C_o$  concentração exterior medida ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ );

$F$  eficiência de filtração;

$X$  taxa de renovação de ar ( $\text{h}^{-1}$ );

$D_r$  taxa de deposição ( $\text{h}^{-1}$ ).

A taxa de deposição é obtida pela equação 3:

$$\text{Taxa de deposição} = \frac{D_v}{R_h - M_h} \quad (3)$$

Em que  $R_h$  representa o pé direito da sala em estudo,  $M_h$  a altura acima do nível do chão em que as concentrações são estimadas e  $D_v$  a velocidade de deposição obtida pela equação  $D_v = G_s \times 0,1356 \times S^{1,9155}$ , sendo  $G_s$  a massa específica do poluente em estudo e  $S$  o diâmetro médio do poluente.

O valor da taxa de renovação de ar,  $X$ , é dado pela seguinte equação:

$$\text{Taxa de renovação de ar} = \frac{T \times Q_f \times P_{tot}}{R_v} \quad (4)$$

Onde  $T$  representa o tempo de referência,  $R_v$  o volume da sala,  $P_{tot}$  a porosidade total e  $Q_f$  o caudal volumétrico na fachada.

O valor do volume da sala é obtido pela equação 5.

$$Rv = Ra \times Rh \quad (5)$$

Sendo  $Ra$  e  $Rh$  a área e o pé direito da sala em estudo, respetivamente.

A porosidade total é dada pela equação seguinte:

$$P_{tot} = Pn + Pa \quad (6)$$

Onde  $Pn$  representa a porosidade natural e  $Pa$  a porosidade artificial.

A porosidade artificial é calculada através da equação 7.

$$Pa = \frac{Ia}{Wa} \quad (7)$$

Onde  $Ia$  é a área de entrada de ar e  $Wa$  a área da parede externa.

O caudal volumétrico na fachada é obtido pela equação 8.

$$Qf = 0,025 \times Kd \times Wa \times Uf \quad (8)$$

Sendo  $Kd$  o coeficiente de direção do vento e  $Uf$  a velocidade do vento na fachada.

O coeficiente de direção do vento é obtido pela equação seguinte:

$$Kd = 0,75 + (0,25 \times \cos Zf) \quad (9)$$

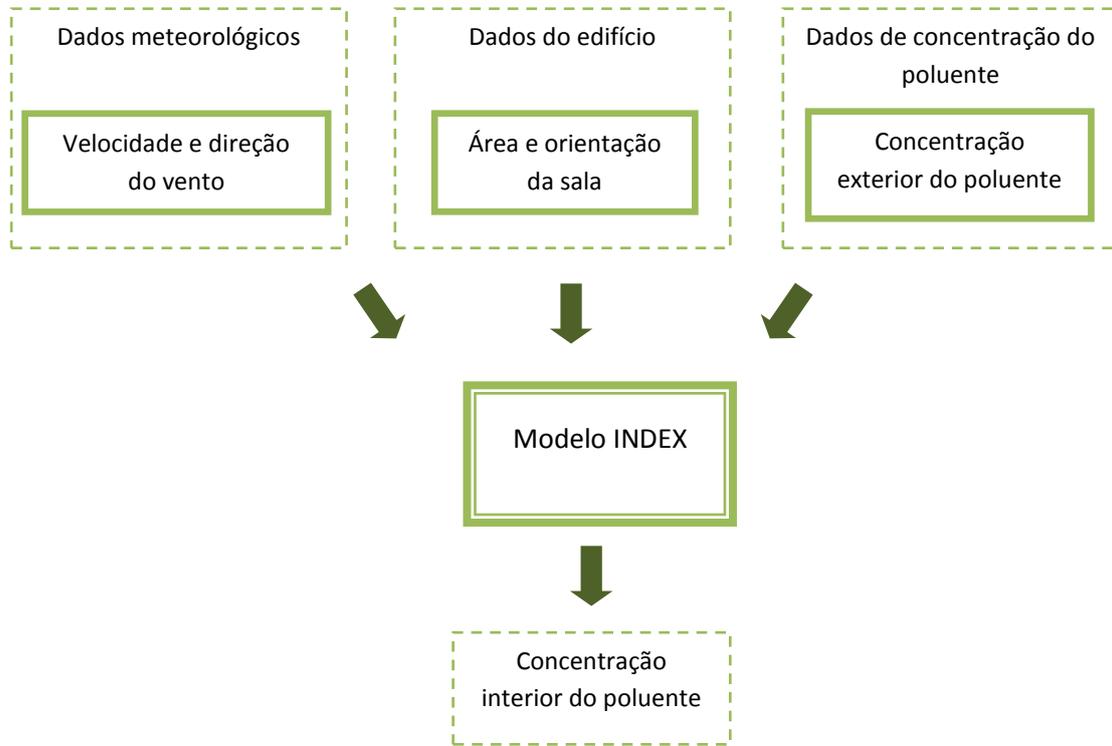
Onde  $Zf$  é a direção do vento relativa à parede externa.

A velocidade do vento na fachada é dada pela equação 10.

$$Uf = Um \times Kr \times Bh^{Kv} \quad (10)$$

Sendo  $Um$  a velocidade do vento associada ao escoamento atmosférico no exterior,  $Kr$  o coeficiente de rugosidade,  $Bh$  a altura média da janela acima do nível do chão e  $Kv$  o coeficiente de velocidade do vento tendo em conta as classes de estabilidade de *Pasquill-Gifford*.

Na figura 4 apresenta-se o fluxograma de identificação das variáveis de entrada e de saída do modelo INDEX.



**Figura 4** – Fluxograma de identificação das variáveis de entrada e de saída do modelo INDEX

INDEX apresenta como limitações o facto de não ter em conta as atividades humanas no interior do edifício e a dependência da meteorologia e da exatidão das concentrações exteriores.



## Capítulo 4 – Simulação numérica da qualidade do ar interior

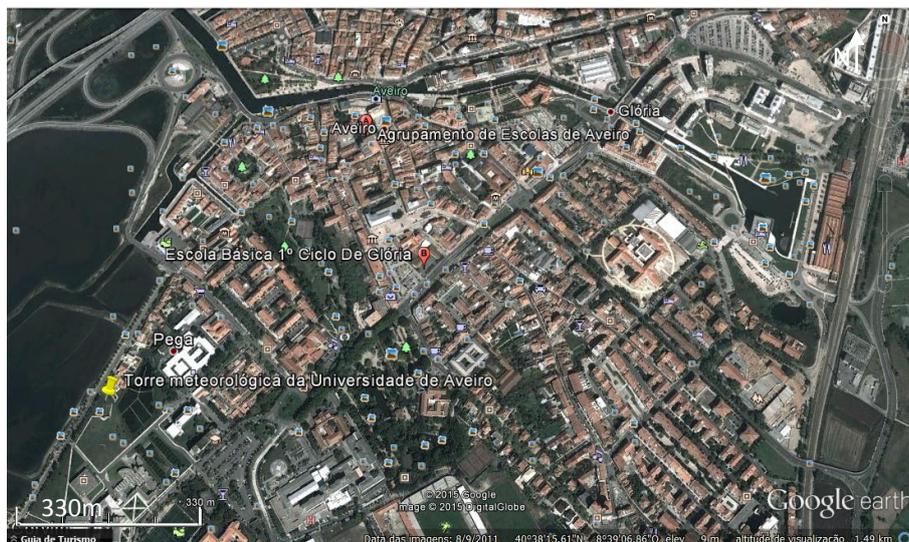
Neste capítulo faz-se uma descrição do caso de estudo, assim como também se apresenta a metodologia utilizada para a simulação numérica da qualidade do ar interior. São ainda analisados os resultados e realizada uma avaliação de sensibilidade.

### 4.1. Caso de estudo

A avaliação da QAI, por modelação foi realizada numa escola da cidade de Aveiro. Aveiro é uma cidade situada na região centro, sub-região do Baixo Vouga, e localiza-se a cerca de 55 km a noroeste de Coimbra e a cerca de 70 km a sul do Porto. O Município de Aveiro é constituído por 14 freguesias, com cerca de 78 000 habitantes e ocupa uma área de aproximadamente 200 km<sup>2</sup>.

A cidade de Aveiro apresenta, durante todo o ano, uma predominância de ventos de Noroeste (NW) com invernos chuvosos e frios e verões secos e quentes.

Para a realização deste trabalho teve-se em conta a informação disponível no âmbito do projeto *Schools Indoor Pollution and Health: Observatory Network in Europe*, SINPHONIE [1]. Este é um projeto de investigação complexo abrangendo as áreas de saúde, meio ambiente, transportes e alteração climática, que visa melhorar a qualidade do ar nas escolas e jardins-de-infância e, consequentemente, reduzir e prevenir as doenças respiratórias causadas pela poluição do ar interior e exterior. O projeto foi implementado no âmbito de um contrato de serviços para a Comissão Europeia (Saúde e Defesa do Consumidor, DG Sanco) e tem como objetivo a avaliação da qualidade do ar em 38 instituições de 25 países [1]. Das três escolas avaliadas, no Município de Aveiro, no âmbito do projeto SINPHONIE, destacou-se a Escola Básica nº1 da Glória, por se situar mais próxima da torre meteorológica da Universidade de Aveiro (UA) e se localizar no centro da cidade, estando assim mais exposta a níveis elevados de poluentes no ar exterior. Na figura 5 apresenta-se a vista aérea de uma parte da cidade de Aveiro com a identificação da Escola Básica nº 1 da Glória e da torre meteorológica da Universidade de Aveiro.



**Figura 5** – Vista aérea da cidade de Aveiro com identificação da Escola Básica nº1 da Glória e da torre meteorológica da UA (Google Earth)

A Escola Básica nº 1 da Glória é constituída por dois blocos, com dois pisos cada e um total de seis salas de aula. Inclui ainda uma biblioteca, um ginásio, quatro gabinetes, uma cantina e algum espaço exterior para o convívio dos alunos. Esta escola possui 320 ocupantes. Os dados compilados referem-se ao ano 2012.

A avaliação da qualidade do ar foi realizada na Escola Básica nº 1 da Glória de 9 a 13 de Janeiro. Para a realização deste estudo escolheu-se a sala de aula número 1, sala R1, que continha 26 alunos. A sala, que se considera como típica no que se refere à tipologia de salas de aula na escola (Alves *et al.*, 2013), situa-se no rés-do-chão do pátio interior da escola, tal como indicada na figura 6.



**Figura 6** – Localização da sala de aula em estudo (SINPHONIE, 2012)

À exceção dos dados meteorológicos provenientes da estação meteorológica da UA, toda a informação foi disponibilizada no âmbito do projeto SINPHONIE.

Na realização deste estudo foram avaliadas partículas com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a  $10\ \mu\text{m}$  (PM10), pois é um dos poluentes com níveis mais elevados de concentração no centro da cidade de Aveiro, tal como monitorizado na estação de monitorização de qualidade do ar, localizada na Escola Secundária José Estêvão.

## 4.2. Metodologia

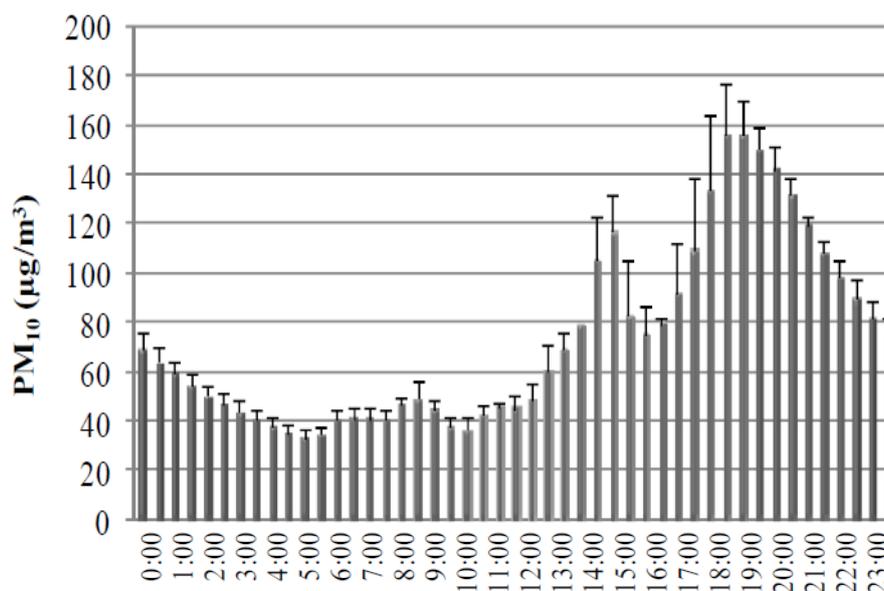
Para a simulação numérica recorrendo ao modelo INDEX, a metodologia adotada implica várias etapas, que passam por:

- Compilação de dados (meteorológicos, da sala de aula, qualidade do ar exterior);
- Estimativa de valores de “fundo”;
- Aplicação do modelo;
- Análise de resultados;
- Análise de sensibilidade.

Numa primeira fase, obtiveram-se os dados necessários para proceder à simulação da QAI, recorrendo ao modelo INDEX, nomeadamente, a dimensão da sala, dados meteorológicos, concentrações do ar exterior e concentrações interiores do material particulado.

Depois da compilação dos dados, selecionou-se o dia 11 de Janeiro de 2012 para a realização do estudo, correspondendo a uma quarta-feira de Inverno, pois era um dos únicos dias que apresentavam dados horários ao longo de todo o dia. O dia selecionado para o estudo, apresentou-se sem precipitação.

De modo a colmatar a questão deste modelo não considerar fontes interiores, foi adicionada uma concentração “fundo” à equação base do modelo, tendo em conta as concentrações médias interiores de PM10, medidas de 9 a 13 de Janeiro, figura 7, e os respetivos períodos de aulas.



**Figura 7** - Perfil de concentração média diária de PM10, de 9 a 13 de Janeiro de 2012 (Alves *et al.*, 2013)

Após a introdução dos dados, efetuou-se a simulação tendo como dados de saída as concentrações do poluente no ar interior e o rácio de concentração interior/externo. Desta forma, os valores simulados têm por base a seguinte equação:

$$\text{Concentração interior} = \frac{C_o \times (1-F) \times X}{Dr + X} + \text{Concentração de "fundo"} \quad (11)$$

Em seguida realizou-se uma análise de sensibilidade onde numa primeira fase, se selecionaram dois períodos, ou seja as horas, durante o período de funcionamento da escola, que apresentam um valor de concentração do poluente mais baixo e um valor mais elevado, nomeadamente as 9 e 16 horas, respetivamente.

Análise de sensibilidade é uma técnica que avalia o efeito de alteração do valor de uma variável, no resultado final. Na análise de sensibilidade são feitas avaliações otimistas e pessimistas sobre variáveis que têm impacto no caso de estudo. Às variáveis que influenciam a concentração do poluente em estudo foram atribuídos diferentes valores. Na tabela 4 apresentam-se os diversos valores atribuídos às variáveis para a análise de sensibilidade.

**Tabela 4** – Variáveis incluídas na análise de sensibilidade e respetivos valores

<b>Velocidade do vento (m·s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Direção do vento (°)</b>	<b>Concentração exterior (µg·m<sup>-3</sup>)</b>	<b>Abertura das janelas (m<sup>2</sup>)</b>
(Muito fraco) 0,5	(Nor-nordeste) 25	(Pouco poluído) 20	(Pouco significativa) 0,2
(Fraco) 4	(Su-sudeste) 160	(Moderadamente poluído) 35	(Significativa) 0,7
(Moderado) 11	(Sudoeste) 225	(Muito poluído) 50	-
(Forte) 16	(Noroeste) 315	(Extremamente poluído) 120	-

Relativamente à variável velocidade do vento foram realizadas avaliações para ventos muito fracos, fracos, moderados e fortes. Para a variável direção do vento, consideraram-se rotações do vento sudeste e noroeste, coincidentes com a orientação das janelas da sala em estudo e tendo também em atenção a direção do vento predominante da área em estudo, respetivamente e para nor-nordeste e su-sudeste. Para a concentração exterior e tendo em conta a classificação do Índice de Qualidade do ar, assumiu-se variações para dias pouco poluídos, moderadamente poluídos, muito poluídos e extremamente poluídos.

Dado que o conforto térmico no interior dos edifícios é essencial para a saúde e o bem-estar dos ocupantes é fundamental a abertura da janelas, principalmente quando a sala se encontra vazia, para criar condições mais confortáveis. Deste modo, e dado à estação do ano em estudo considerou-se abertura pouco significativa e significativa, sendo que para a simulação de referência, considerou-se as janelas totalmente fechadas.

### 4.3. Condições de aplicação

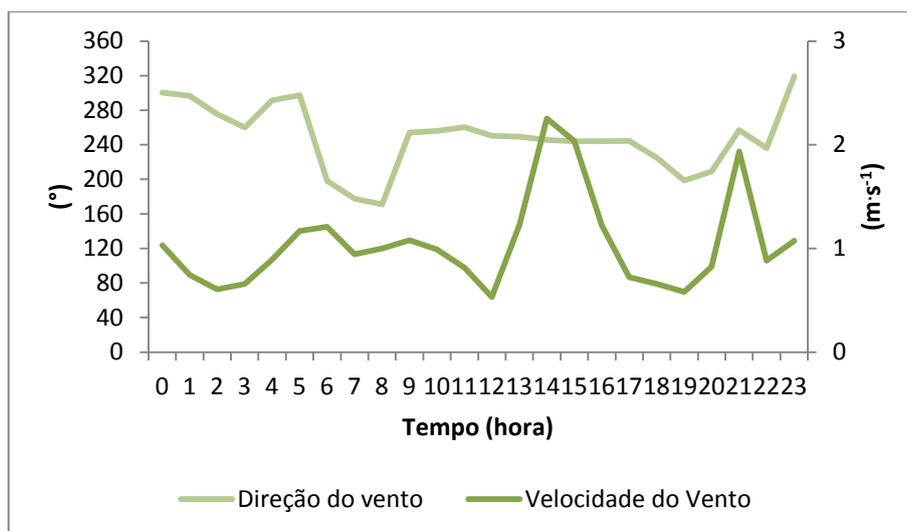
Para a aplicação do modelo INDEX são necessários vários dados de entrada, sendo estes descritos posteriormente.

### 4.3.1. Caraterísticas do edifício

As caraterísticas do edifício são importantes para a aplicação do modelo INDEX. Todas as informações relativas ao edifício baseiam-se no projeto SINPHONIE. A sala de aula número 1, com uma área de 44,3 m<sup>2</sup> apresenta um pé direito de 3,5 m e conseqüentemente um volume de 155,1 m<sup>3</sup>. Esta sala está em contato com uma única parede externa com 28 m<sup>2</sup>. A altura média das janelas relativamente ao nível do chão é de 1,5 m e, para a simulação de referência considerou-se que a área de entrada de ar controlada é de 0 m<sup>2</sup>.

### 4.3.2. Condições meteorológicas

Como dito precedentemente, os dados relativos à meteorologia são provenientes da estação meteorológica da Universidade de Aveiro. A figura 8 mostra a evolução horária dos dados de velocidade do vento e direção do vento medidos ao longo do dia 11 de Janeiro.



**Figura 8** – Valores de velocidade e direção do vento medidos na estação meteorológica da UA para o dia 11 de Janeiro

Tendo em conta a figura 8 verifica-se valores de vento fraco, sendo necessário um cuidado especial para a análise do vento. Deste modo, para uma velocidade média de 2 m·s<sup>-1</sup> constata-se ventos sudoeste.

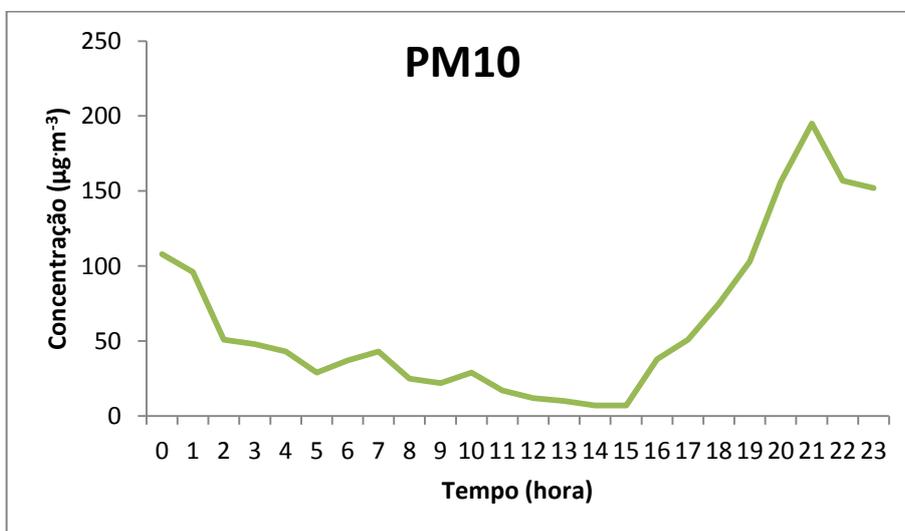
### 4.3.3. Qualidade do ar exterior

As medições no exterior da escola básica nº 1 da Glória foram realizadas no âmbito do projeto SINPHONIE, com o apoio de uma carrinha de monitorização de qualidade do ar. Esta encontrava-se dentro do recinto da escola, figura 9.



**Figura 9** – Carrinha usada na campanha de monitorização da qualidade do ar exterior na Escola Básica nº 1 da Glória

Na figura 10 são apresentados os valores de concentração de PM10 no ar ambiente, medidos no âmbito do projeto SINPHONIE.



**Figura 10** – Valores de concentração de PM10 medidos no ar ambiente na Escola Básica nº 1 da Glória, no âmbito do projeto SINPHONIE

Com a análise da figura 10, verifica-se que a concentração de PM10 atinge o seu máximo às 21 horas. Segundo Borrego *et al.* (2010) os valores elevados registados nos períodos de inverno,

durante a noite, poderão estar relacionados com a queima de biomassa para o aquecimento doméstico, originando impactes significativos na qualidade do ar, em particular, nas concentrações de matéria particulada.

Para o dia em estudo, a média diária dos valores medidos é de  $63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , ou seja, os valores limite para a proteção da saúde humana, de acordo com o Decreto-Lei nº 102/2010, não são ultrapassados. Dado a legislação, o valor limite diário de PM10 é de  $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  a não exceder mais de 35 vezes por ano civil e com uma margem de tolerância de 50%.

#### 4.3.4. Concentração de “fundo”

Como já foi referido previamente, o modelo INDEX não tem em conta fontes interiores. Para ultrapassar essa situação, houve a necessidade de contabilizar o efeito de potenciais fontes internas recorrendo à média dos valores de concentrações interiores medidos do dia 9 a 13 de Janeiro, na sala número 1 da Escola Básica nº 1 da Glória no âmbito do projeto SINPHONIE.

A tabela 5 apresenta os valores de concentração de “fundo” para os respetivos períodos escolares.

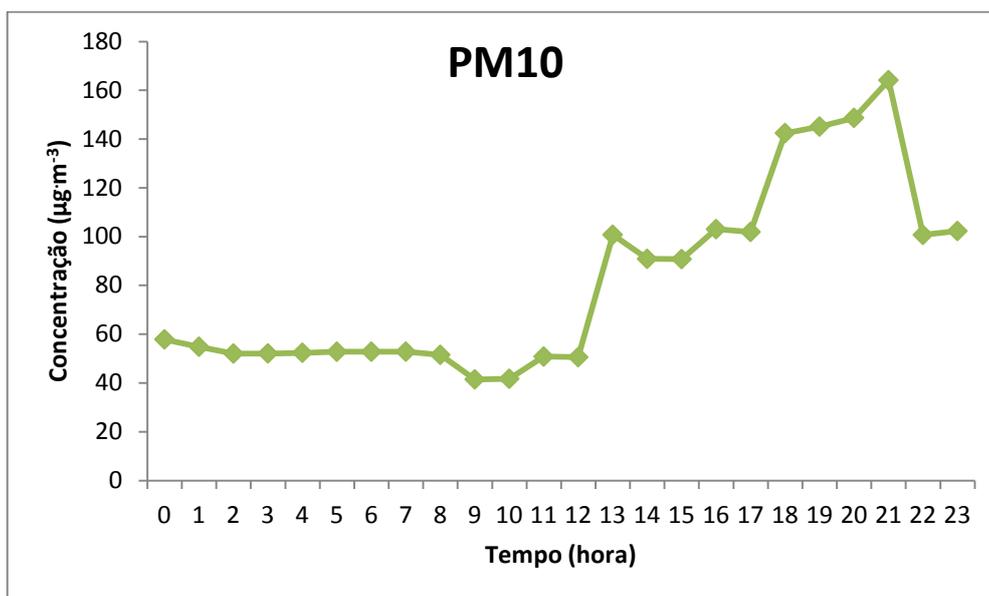
**Tabela 5** – Valores de concentração de “fundo” para os respetivos períodos

Período escolar	Concentração de fundo ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )
[00:00-09:00[	50
[09:00-11:00[	40
[11:00-13:00[	50
[13:00-14:00[	100
[14:00-16:00[	90
[16:00-18:00[	100
[18:00-22:00[	140
[22:00-00:00[	90

De acordo com os valores apresentados na tabela 6 verifica-se que o período das [18:00- 22:00[ se destaca, aparecendo-se como o período com um valor médio de concentração interior de PM10 mais elevado.

#### 4.4. Resultados

O sistema de modelação INDEX foi aplicado ao caso de estudo, permitindo calcular a concentração interior de PM10 na sala R1. Na figura 11 apresentam-se os resultados da simulação da concentração interior de PM10.



**Figura 11** – Valores de concentração interior de PM10 simulado com base nos dados do projeto SINPHONIE para a sala R1 da Escola Básica nº 1 da Glória

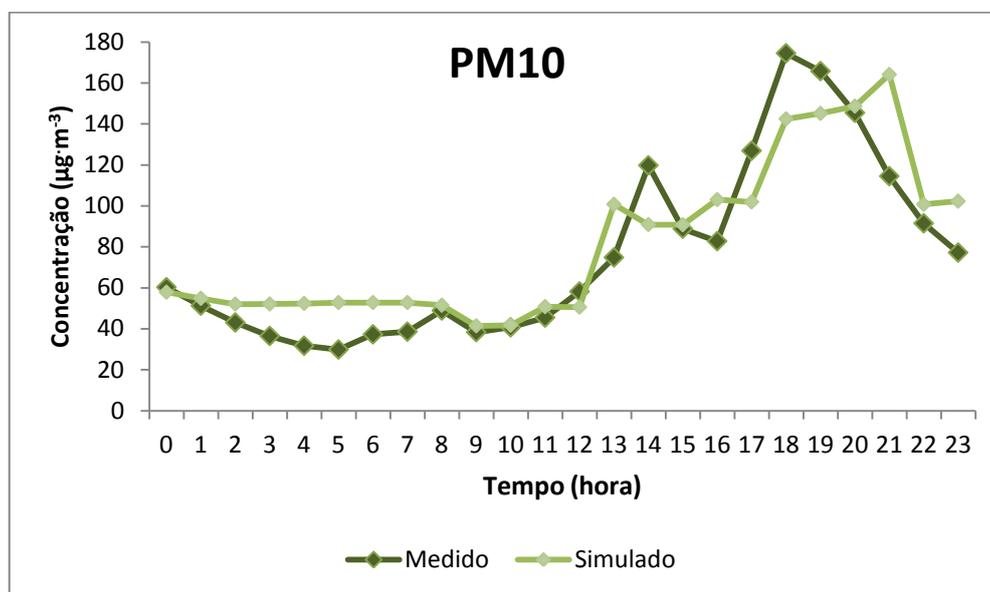
Com a figura 11 verifica-se que no início do dia as concentrações interiores de PM10 não sofrem variações consideráveis, havendo uma aumento acentuado às 12 horas. No resto do dia verifica-se variações pouco significativas, contudo às 21 horas constata-se o pico máximo.

Durante o período escolar, as concentrações máximas interiores de PM10 são registadas com a entrada ou a saída dos alunos da sala de aula. No entanto, a concentração máxima interior do poluente em estudo, no período de funcionamento da sala de aula, regista-se no final da tarde, podendo dever-se às atividades de limpeza.

Na medida em que o modelo aplicado depende da concentração no ar ambiente e uma vez que o edifício não é totalmente hermético ao ar exterior, as concentrações simuladas após as 19 horas poderão estar relacionadas com processos de combustão, essencialmente para aquecimento, visto ser um dia de inverno.

Para 8 horas de período de funcionamento do edifício, a média diária dos valores simulados é de  $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . De acordo com a portaria nº 353-A/2013, observa-se que as concentrações interiores de PM10 encontram-se dentro dos valores máximos permitidos, pois apesar de ultrapassarem o valor limiar de proteção de  $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , não excedem o valor de margem de tolerância, de  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  numa média de 8 horas de funcionamento do edifício.

Na figura 12, são apresentados os valores comparativos das concentrações interiores de PM10 medidos no interior da sala pelo grupo de trabalho do projeto SINPHONIE e os valores simulados pelo modelo INDEX.



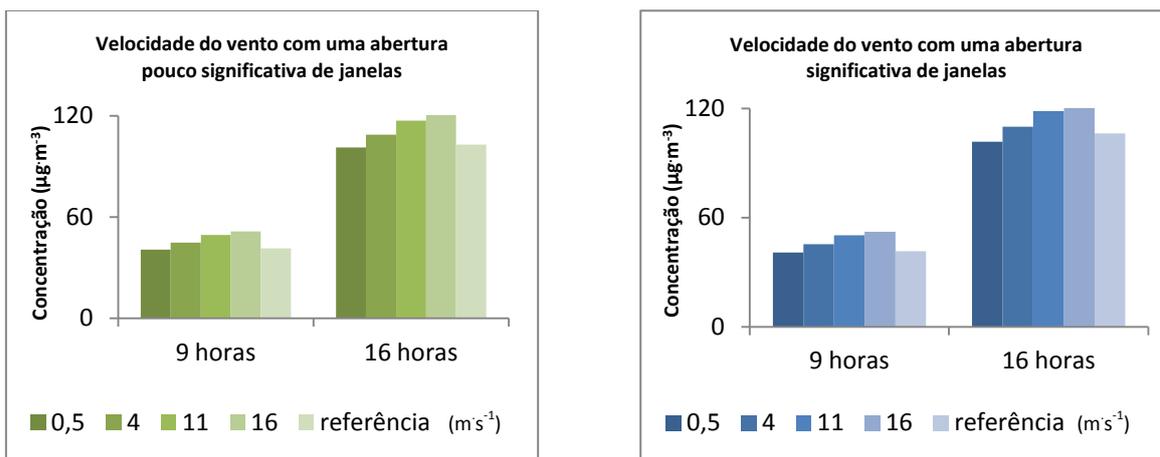
**Figura 12** - Valores de concentração interior de PM10 medidos e simulados com base nos dados do projeto SINPHONIE para a sala R1 da Escola Básica nº 1 da Glória

Analisando a figura 12 verifica-se que os valores seguem a mesma tendência, contudo nunca se consegue uma concordância total entre resultados obtidos com base em modelos e em medições. Uma possível razão para a discrepância de valores pode estar diretamente relacionada com as concentrações exteriores de PM10 e com os valores atribuídos para a concentração de “fundo”.

#### 4.5. Análise de sensibilidade

Como previamente mencionado, nesta avaliação testou-se a velocidade do vento para ventos muito fracos, fracos, moderados e fortes, a direção do vento para ventos sudeste, noroeste, nor-nordeste e su-sudeste, a concentração do ar ambiente para dias pouco poluídos, moderadamente poluídos, muito poluídos e extremamente poluídos e a abertura das janelas para abertura pouco significativa e significativas.

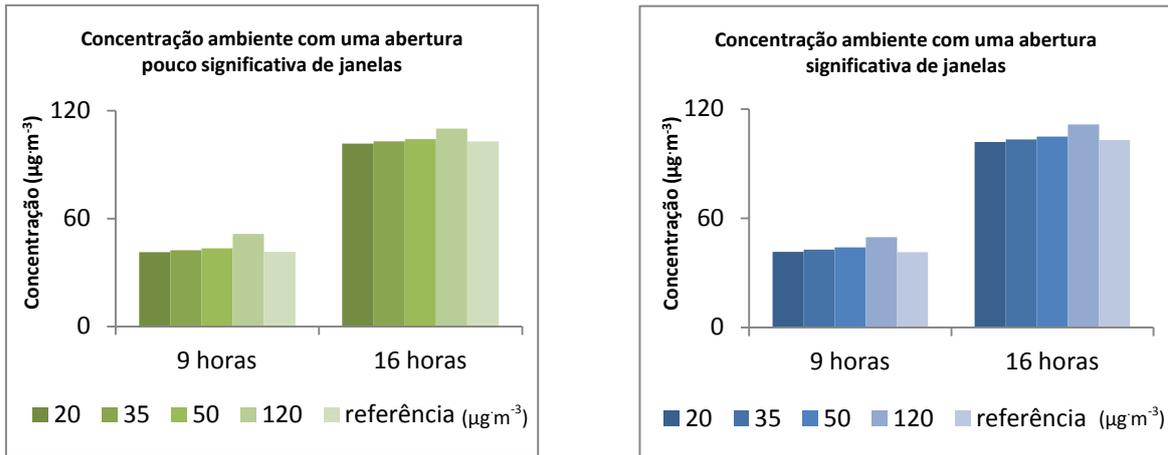
Na figura 13 podem observar-se os resultados da análise de sensibilidade para a variável velocidade do vento com abertura pouco significativa e significativa de janelas, tendo como referência o período com valor de concentração mais baixo, 9 horas, uma concentração ambiente de  $22 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , uma velocidade do vento de  $1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $120^\circ$  de direção do vento e, para o período com valor de concentração mais elevado, 16 horas, uma concentração ambiente de  $38 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , uma velocidade do vento de  $1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $124^\circ$  de direção do vento.



**Figura 13** – Análise de sensibilidade para a variável velocidade do vento com diferentes aberturas de janelas

Interpretando a figura 13 são evidentes as influências das variações da velocidade do vento sobre a concentração interior de PM10. Para ambos os períodos é visível que para ventos muito fracos é aconselhável abrir as janelas, pois verifica-se uma diminuição da concentração interior do poluente.

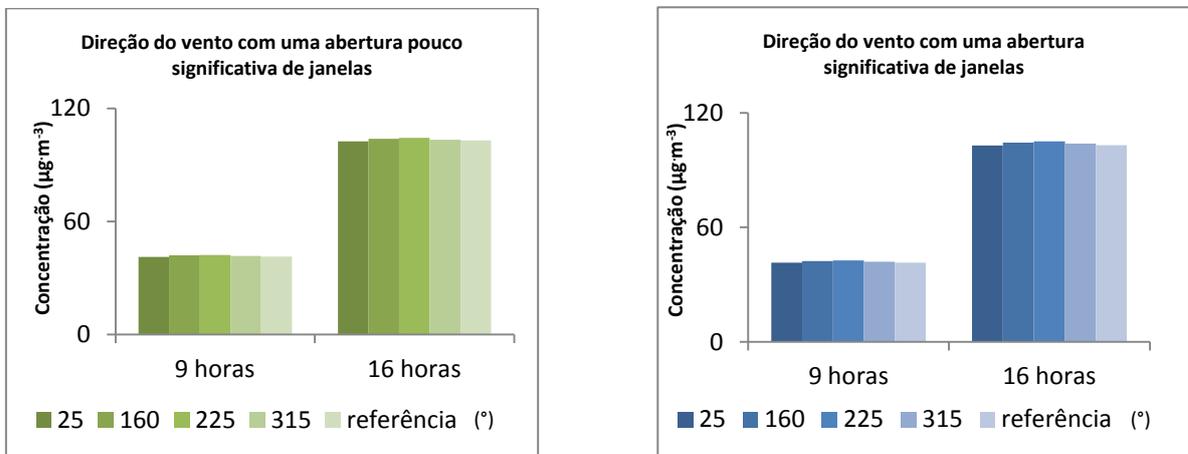
A figura 14 apresenta os resultados provenientes da análise de sensibilidade para a grandeza concentração ambiente em função da abertura de janelas.



**Figura 14** - Análise de sensibilidade para a variável concentração ambiente com diferentes aberturas de janelas

Com base na figura 14 são percebidas variações pouco acentuadas na concentração interior de PM10, contudo, pode-se constatar que para uma redução da concentração interior do poluente deve-se abrir as janelas em dias pouco poluídos.

Os resultados da análise de sensibilidade para a variável direção do vento em função da abertura de janelas são apresentados na figura 15.



**Figura 15** - Análise de sensibilidade para a variável direção do vento com diferentes aberturas de janelas

Através da figura 15 verifica-se que as variações efetuadas não interferem de forma significativa na concentração interior, podendo-se aferir que para garantir uma melhor qualidade do ar interior com base no PM10 é recomendado abrir as janelas aquando ventos nor-nordeste.

A análise de sensibilidade aponta que o parâmetro direção do vento é o que menos influencia na determinação da concentração interior de PM10. De todas as variações, a velocidade do vento e a

concentração ambiente são as grandezas mais influentes, garantindo uma redução da concentração interior de PM10 mais significativa.



## Capítulo 5 – Conclusões

A preocupação com a qualidade do ar interior em edifícios está relacionada com a exposição dos seus ocupantes a uma variedade de poluentes com reflexos negativos no comportamento, na produtividade, no bem-estar e na saúde das pessoas. O controlo da qualidade do ar interior em edifícios é, sem dúvida, um problema de saúde pública que importa solucionar, em benefício dos seus ocupantes.

A avaliação da qualidade do ar é crucial para entender, de uma forma pormenorizada, a influência dos vários parâmetros do ar interior nos ocupantes dos edifícios, seja relativamente ao conforto térmico ou à qualidade do ar.

A utilização de um modelo de simulação adequado é fundamental para uma correta avaliação de qualidade do ar interior. O modelo de qualidade do ar interior INDEX foi o modelo utilizado para a modelação numérica da qualidade do ar interior da sala de aula em estudo. Com base na informação disponibilizada no âmbito do projeto SINPHONIE, este modelo permitiu estimar as concentrações interiores de PM10 numa sala de aulas da Escola Básica nº 1 da Glória. Uma vez que o modelo utilizado não tem em conta as atividades humanas no interior do edifício, foi necessário considerar uma concentração interior de fundo de PM10 variável ao longo do dia. Tendo em conta as incertezas associadas ao modelo, os resultados obtidos foram aceitáveis.

Com este estudo conclui-se também que o INDEX é uma ferramenta que permite fazer uma rápida análise da concentração do poluente apresentando resultados aproximados à realidade, sendo que, na grande maioria das situações os erros detetados poderão relacionar-se com simplificações adotadas.

A análise de sensibilidade das variáveis do modelo de qualidade do ar interior ajuda a compreender a importância de cada grandeza sobre a concentração interior do poluente. Os parâmetros do modelo com maior influência na concentração interior são a velocidade do vento e a concentração ambiente em função da abertura de janelas.

Com base na ferramenta INDEX, a previsão da concentração de poluentes pode ser útil na definição de estratégias para a qualidade do ar interior, nomeadamente na implementação de medidas de minimização.

Uma gestão adequada da ventilação é essencial de maneira a que as condições exteriores impliquem um menor impacto no conforto dos ocupantes. Deste modo, medidas corretivas para uma melhor qualidade do ar interior referente à otimização da ventilação seria a abertura das janelas em dias pouco poluídos e com vento muito fraco. As atividades dos alunos e as operações de limpeza poderão ser também fatores que condicionam a qualidade do ar interior, sendo

recomendado a utilização dos quadros interativos em alternativa aos quadros de giz e optar pela utilização de aspirador nas rotinas de limpeza das salas.

Apesar de os valores de PM10 medidos e simulados cumprirem o valor máximo legislado, ou seja o valor de margem de tolerância de  $100 \mu\text{g m}^{-3}$ , seria uma mais valia avaliar mais poluentes de modo a verificar se a escola em estudo apresentará uma boa qualidade do ar interior.

A simulação da concentração interior com base noutros modelos de qualidade de ar interior, assim como a avaliação de diversos poluentes seriam os objetivos a alcançar em trabalhos a desenvolver no futuro.

## Referências bibliográficas

Agência Europeia do Ambiente (EEA). (2007). Europe's environment: the fourth assessment. Serviço das Publicações Oficiais das Comunidades Europeias. Copenhaga.

Allard, F. (1998). *Natural Ventilation in Buildings: A Design Handbook*.

Almeida, S., Canha, N., Silva, A., Freitas, M., Pegas, P., Alves, C., Evtugina, M., Pio, C. (2011). Children exposure to atmospheric particles in indoor of Lisbon primary schools. *Atmospheric Environment*, 45, 7594-7599.

Alves, C., Nunes, T., Silva, J., Duarte, M. (2013). Comfort Parameters and Particulate Matter (PM10 and PM2.5) in School Classrooms and Outdoor Air. *Aerosol and Air Quality Research*. 1521-1535.

Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2009). Qualidade do Ar em Espaços Interiores – Guia Técnico, 2-16.

Awbi, H. (2003). *Ventilation of Buildings*. Spon Press.

Borrego, C., Valente, J., Carvalho, A., Sá, E., Lopes, M., Miranda, A. (2010). Contribution of residential wood combustion to PM10 levels in Portugal. *Atmospheric Environment*, 44 (5), 642-651.

Csobod, E., Heszlényi, J., Schróth, A. (2007). Improving indoor air quality in schools. Regional Environmental Center, Hungary.

Csobod, E., Annesi-Maesano, I., Carrer, P., Kephelopoulos, S., Madureira, J., Rudnai, P., Fernandes, E. (2014). SINPHONIE - Schools Indoor Pollution and Health: Observatory Network in Europe: Executive Summary of the Final Report. Regional Environmental Center. Hungary.

Cunha, A. (2014). Modelação da qualidade do ar interior ao abrigo do RSECE-QAI – Previsão dos campos médios de poluentes. Dissertação apresentada à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro para obtenção de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

European Collaborative Action (ECA). (2003). Urban Air, Indoor Environment and Human Exposure – Ventilation, Good Indoor Air Quality and Rational Use of Energy, Report No 23.

Etheridge, D. (2012). *Natural Ventilation of Buildings: Theory, Measurement and Design*. John Wiley & Sons, Inc.

Fanger, O. (2006). What is IAQ?. *Indoor Air*. 328-334.

Fisk, W., Almeida, A. (1998). Sensor-based demand-controlled ventilation: a review. *Energy and Buildings*. 35-45.

Fraga, S., Ramos E., Martins, A., Samúdio, M., Silva, G., Guedes, J., Fernandes, E., Barros, H. (2008). Qualidade do ar interior e sintomas respiratórios em escolas do Porto. *Revista Portuguesa de Pneumologia*. 487-507.

Fromme, H., Twardella, D., Dietrich, S., Heitmann, D., Schierl, R., Liebl, B., Ruden, H. (2007). Particulate matter in the indoor air of classrooms—exploratory results from Munich and surrounding area. *Atmospheric Environment*. 854-866.

Gallego, E., Roca, X., Perales, J., Guardino, X. (2009). Determining indoor air quality and identifying the origin of odour episodes in indoor environments. *Journal of Environmental Sciences*. 333-339.

Ionescu, C., Baracu, T., Vlad, G., Necula, H., Badea, A. (2015). The historical evolution of the energy efficient buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49. 243–253.

Jenkins, D., Peacock, D., Banfill, P. (2009). Will future low-carbon schools in the UK have an overheating problem?. *Building and Environment*. 490-501.

Lee, S., Chang, M. (2000). Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong. *Chemosphere*. 109-113.

Mendell, M., Heath, G. (2003). Do Indoor Pollutants and Thermal Conditions in Schools Influence Student Performance? A Critical Review of the Literature. *Indoor Air Journal*. 27-32.

Organização Mundial de Saúde (OMS). (2006). *Air Quality Guidelines - Global Update 2005*. Copenhaga: WHO Regional Office for Europe. ISBN 92 890 2192 6.

Organização Mundial de Saúde (OMS). (2010). *Who guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. Bona: WHO European Centre for Environment and Health.

Pegas, P., Nunes, T., Pio, C., Almeida, S., Alves, C., Cerqueira, M., Evtuygina, M., Franchi, M., Freitas, M. (2011). Indoor air quality in elementary schools of Lisbon in Spring. *Environmental Geochemistry and Health*. 455-468.

Pereira, A., Bessa, R. (2012). Eficiência energética dos sistemas de AVAC em edifícios.

Ramos, J. (1998). Modelação do Comportamento Térmico e Ambiental em Edifícios. Dissertação apresentada ao Instituto Superior Técnico de Lisboa para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica. Instituto Superior Técnico de Lisboa.

Schirmer, W., Pian, L., Szymanski, E., Gauer, M. (2011). A poluição do ar em ambientes internos e a síndrome dos edifícios doentes. *Ciência & Saúde Coletiva*. 3583-3590.

Silva, J. (2010). Caracterização química e biológica de PM10 em ambiente escolar. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Universidade do Aveiro.

Schools Indoor Pollution and Health: Observatory Network in Europe (SINPHONIE). (2012). School check list\_Glória School\_Room01.

Tirone, L. (2007). Construção Sustentável. Tirone Nunes, S. A.

Uhde, E., Salthammer, T. (2007). Impact of reaction products from building materials and furnishings on indoor air quality—A review of recent advances in indoor chemistry. *Atmospheric Environment*. 3111– 3128.

## **Legislação**

ISO 7730:2005, Ergonomics of the Thermal Environment.

Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto. Diário da república, 1.ª série – Nº 159. Ministério da Economia e do Emprego.

Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro. Diário da república, 1.ª série – Nº 186. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território.

Directiva 2002/91/CE, de 16 de dezembro. Jornal Oficial das Comunidades Europeias. Parlamento Europeu e do Conselho.

Directiva 2010/31/UE, de 19 de maio. Jornal Oficial da União Europeia. Parlamento Europeu e do Conselho.

Portaria n.º 353-A/2013, de 4 de dezembro. Diário da República, 1.ª série – N.º 235. Ministério do Ambiente, Ordenamento do território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, emprego e Segurança Social.

## Websites

[1] Schools Indoor Pollution and Health: Observatory Network in Europe (SINPHONIE). What is SINPHONIE? Consultado em 28 de Maio de 2015, de SINPHONIE: <http://www.sinphonie.eu/>

[2] Environmental Protection Agency (EPA). Air Quality Management Online Portal. Consultado em 6 de Março de 2015, de Air Quality Modeling: <http://www.epa.gov/oaqps001/aqmpportal/management/modeling/index.htm>

[3] Integrated Environmental Health Impact Assessment System (IEHIAS). Consultado em 19 de Março de 2015, de INDEX: Indoor Exposure Model: [http://www.integrated-assessment.eu/resource\\_centre/index\\_indoor\\_exposure\\_model](http://www.integrated-assessment.eu/resource_centre/index_indoor_exposure_model)

[4] National Institute of Standards and Technology (NIST). NIST Multizone Modeling Website. Consultado em 15 de Abril de 2015, de CONTAM: <http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/CONTAM/overview/1.htm>

[5] Environmental Protection Agency (EPA). (2000). IAQ Tools for Schools: Indoor Air Quality and Student Performance. Consultado em 6 de Setembro de 2015, de Creating Healthy Indoor Air Quality in Schools: <http://www2.epa.gov/iaq-schools>

[6] Integrated Environmental Health Impact Assessment System (IEHIAS). RISK IAQ model. Consultado em 26 de Abril de 2015, de <http://www.integrated-assessment.eu/node/228>

[7] Environmental Energy Technologies Division (EETD). Consultado em 29 de Abril de 2015, de COMIS: An Interzonal Air-Flow Model: <http://eetd.lbl.gov/newsletter/nl01/eetd-nl01-3-comis.html>

[8] École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Comis - Multizone air flow simulation. Consultado em 6 de Maio de 2015, de Multizone air infiltration and ventilation simulation software: <http://leso.epfl.ch/page-39255-en.html>