



# **Níveis de PM<sub>2,5</sub> em Zona Industrial do Nordeste de Portugal**

**Rafaela Cruz Alves**

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para  
obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental  
No âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

Orientado por

**Professor Doutor Manuel Feliciano  
Professor Doutor Artur Jorge de Jesus Gonçalves  
Professora Doutora Leila Droprinchinski Martins**

**Bragança**

**2018**



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida, pela fé e pela força, que me concedeu para chegar ao final dessa etapa e para as próximas que virão.

Agradeço a todos meus familiares, principalmente meus pais Rafael da Rocha Alves e Silvana Cruz da Rocha Alves pelos ensinamentos e por todo apoio emocional e financeiro me concedido por toda a vida, e por toda a dedicação em querer sempre o melhor para mim. Agradeço a minha irmã Gabriela Cruz Alves por todo apoio e o carinho concedido.

Agradeço, em especial, ao meu orientador Prof<sup>o</sup>. Dr. Manuel Feliciano, por seu conhecimento e apoio, que contribuiu para a realização de uma importante etapa da minha vida e para a conclusão deste projeto. Agradeço também a coorientação do Prof<sup>o</sup>. Dr. Artur Gonçalves e em especial da Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Leila Droprinchinski Martins por toda ajuda, dedicação em me auxiliar e orientar.

Agradeço aos meus amigos do Brasil e aos de Bragança por toda alegria e amizade prestada nesses meses.

Um agradecimento em especial para a pessoa mais importante da minha vida, meu companheiro e melhor amigo Matheus Luz Alberti, por ter me ajudado todos os dias, com suas palavras de apoio e compreensão, pelo seu carinho e amizade.



## RESUMO

A qualidade do ar nas áreas industriais urbanas causa grande preocupação, pelos impactos negativos que poder ter na saúde humana. De entre os poluentes atmosféricos, o material particulado é um dos mais abundantes nas atmosferas desses locais onde as atividades humanas se concentram. O material particulado é predominantemente emitido por fontes antrópicas, podendo ficar suspensas no ar por horas ou até mesmo semanas, muitas vezes, transportadas para regiões mais distantes. Os níveis de partículas finas inaláveis ( $PM_{2,5}$ ) foram monitoradas na Zona Industrial de Mirandela e na sua envolvente próxima, de modo a avaliar a influência da Zona Industrial (ZI) na magnitude deste poluente no ar. As concentrações de  $PM_{2,5}$  foram medidas em 9 locais, entre abril e junho de 2018. No total foram realizadas 11 campanhas de medição, quatro no período diurno, cinco no período vespertino e dois no período noturno. A análise das médias da concentração de  $PM_{2,5}$  da área obteve resultados esperados, onde os pontos localizados no perímetro da ZI apresentaram maiores concentrações quando comparados com os pontos localizados na sua envolvente. Os valores médios variaram entre  $7\mu g/m^3$  e  $13\mu g/m^3$  e os máximos entre  $18\mu g/m^3$  e  $87\mu g/m^3$ . Na envolvente, as concentrações médias foram sistematicamente mais baixas, tendo variado entre  $6\mu g/m^3$  e  $7\mu g/m^3$  e as máximas entre  $17\mu g/m^3$  e  $35\mu g/m^3$ . Apesar da existência de algumas fontes industriais de material particulado, o tráfego rodoviário foi identificado como a principal fonte durante o período de avaliação. Além da forte correlação entre o padrão espacial da intensidade de tráfego e o padrão espacial dos níveis de  $PM_{2,5}$ , comprovados pelo coeficiente de Pearson ( $r = 96\%$ ), a variação diária das concentrações de  $PM_{2,5}$  reflete igualmente o efeito dos picos de tráfego registados nos períodos de entrada e saída dos trabalhadores. Os níveis de  $PM_{2,5}$  registados não foram críticos face aos limiares da legislação Portuguesa, deve-se, no entanto, estender o estudo a outros períodos do ano, uma vez que algumas empresas da zona industrial apresentam funcionamento sazonal.

**Palavras-chave:** Material particulado, monitorização, padrão espacial, Mirandela.



## ABSTRACT

Air quality in urban industrial areas is a cause for great concern because of the negative impacts it may have on human health. Among air pollutants, particulate matter is one of the most abundant in the atmospheres of these places where human activities are concentrated. Particulate matter is predominantly emitted by anthropogenic sources and can be suspended in the air for hours or even weeks, often transported to further regions. The inhalable fine particulate levels ( $PM_{2.5}$ ) were monitored in the Mirandela Industrial Zone and its surroundings, to evaluate the influence of the Industrial Zone (ZI) on the magnitude of this pollutant in the air.  $PM_{2.5}$  concentrations were measured at nine sites between April and June 2018. A total of 11 measurement campaigns were carried out, four in the daytime period, five in the evening period and two in the night period. The analysis of the mean  $PM_{2.5}$  concentration of the area obtained expected results, where the points located in the perimeter of the ZI presented higher concentrations when compared to the points located in its surroundings. The mean values ranged between  $7\mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $13\mu\text{g}/\text{m}^3$  and the maximum values between  $18\mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $87\mu\text{g}/\text{m}^3$ . In the surroundings, the average concentrations were systematically lower, ranging between  $6\mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $7\mu\text{g}/\text{m}^3$  and the maximum values between  $17\mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Despite the existence of some industrial sources of particulate matter, road traffic was identified as the main source during the evaluation period. In addition to the strong correlation between the spatial pattern of traffic intensity and the spatial pattern of  $PM_{2.5}$  levels, as demonstrated by the Pearson coefficient ( $r = 96\%$ ), the daily variation in  $PM_{2.5}$  concentrations also reflect the effect of peaks registered in the periods of entry and exit of workers. The  $PM_{2.5}$  levels recorded were not critical to the thresholds of the Portuguese legislation, however, it is necessary to extend the study to other periods of the year, since some companies of the industrial zone have a seasonal operation.

**Keywords:** Particulate matter, monitoring, spatial pattern, Mirandela.



## ÍNDICE

|                                                                            |      |
|----------------------------------------------------------------------------|------|
| AGRADECIMENTOS .....                                                       | iii  |
| RESUMO .....                                                               | v    |
| ABSTRACT .....                                                             | vii  |
| LISTA DE FIGURAS .....                                                     | xi   |
| LISTA DE TABELAS .....                                                     | xii  |
| ABREVIATURAS E/OU SIGLAS .....                                             | xiii |
| 1. INTRODUÇÃO.....                                                         | 1    |
| 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....                                                | 1    |
| 1.2 OBJETIVOS.....                                                         | 2    |
| 1.3 ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO .....                              | 2    |
| 2. PARQUES ECO-INDUSTRIAIS .....                                           | 5    |
| 2.1 CONCEITOS E PROCESSO EVOLUTIVO.....                                    | 5    |
| 2.1.1 Simbiose Industrial (SI).....                                        | 8    |
| 2.1.2 Metabolismo Industrial.....                                          | 9    |
| 2.1.3 Parques Eco-Industriais (PEI's).....                                 | 10   |
| 2.2 TIPOS DE DESENVOLVIMENTO ECO-INDUSTRIAL.....                           | 12   |
| 2.3 PRINCIPAIS ASPETOS AMBIENTAIS DAS ZONAS INDUSTRIAIS .....              | 13   |
| 2.4 OPORTUNIDADES E DESAFIOS .....                                         | 15   |
| 3. QUALIDADE DO AR EM AMBIENTES INDUSTRIAIS .....                          | 17   |
| 3.1 VISÃO EM GERAL.....                                                    | 17   |
| 3.2 FONTES DOS PRINCIPAIS POLUENTES ATMOSFÉRICOS .....                     | 18   |
| 3.3 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E EFEITOS DO MATERIAL PARTICULADO (PM)..... | 19   |
| 3.3.1 Classificação do Material Particulado (PM).....                      | 20   |
| 3.3.2 Concentrações Típicas de Material Particulado .....                  | 21   |
| 3.3.3 Material Particulado e seus Efeitos no Homem e no Ambiente .....     | 22   |
| 3.4 ENQUADRAMENTO LEGISLATIVO .....                                        | 24   |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 3.5 GESTÃO DA QUALIDADE DO AR EM AMBIENTES INDUSTRIAIS.....           | 27 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS.....                                           | 29 |
| 4.1 ÁREA DE ESTUDO .....                                              | 29 |
| 4.2 MONITORIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO RESPIRÁVEL.....             | 31 |
| 4.2.1 Instrumentação.....                                             | 31 |
| 4.2.2 Seleção e Caracterização dos pontos de Medição .....            | 32 |
| 4.2.3 Campanhas de medição .....                                      | 35 |
| 4.3 RECOLHA DE DADOS COMPLEMENTARES .....                             | 36 |
| 4.4 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS .....                           | 37 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                       | 39 |
| 5.1 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS.....                                     | 39 |
| 5.2 MATERIAL PARTICULADO PM <sub>2,5</sub> NA ÁREA DE ESTUDO.....     | 42 |
| 5.2.1 Concentrações de PM <sub>2,5</sub> no Período de Avaliação..... | 42 |
| 5.2.2 Padrão Espacial dos Níveis de PM <sub>2,5</sub> .....           | 45 |
| 5.2.3 Ciclo Diário dos Níveis de PM <sub>2,5</sub> .....              | 48 |
| 5.3 RELAÇÃO DE PM <sub>2,5</sub> E CONDIÇÕES AMBIENTAIS .....         | 49 |
| 5.4 ESTRATÉGIAS DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE MATERIAL PARTICULADO .     | 51 |
| 6. CONCLUSÃO.....                                                     | 53 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                      | 55 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Fluxograma do funcionamento da Ecologia Industrial. ....                                                                                                 | 6  |
| Figura 2: Representação dos níveis da Ecologia Industrial. ....                                                                                                    | 7  |
| Figura 3: Ilustração esquemática das diferenças entre a Simbiose Industrial e Parque Eco-Industrial. ....                                                          | 11 |
| Figura 4: Sequência de transformação dos poluentes atmosféricos na atmosfera. ....                                                                                 | 15 |
| Figura 5: Classificação das partículas em função do diâmetro aerodinâmico equivalente. ....                                                                        | 21 |
| Figura 6: Deposição de material particulado no sistema respiratório humano. ....                                                                                   | 23 |
| Figura 7: Visibilidades atmosférica no mesmo local em momentos distintos: a) atmosfera limpa e b) atmosfera com elevada densidade de partículas em suspensão. .... | 24 |
| Figura 8: Temperatura média para a área de estudo, no período de 1971-2000. ....                                                                                   | 29 |
| Figura 9: Localização e configuração da Zona Industrial de Mirandela. ....                                                                                         | 30 |
| Figura 10: Equipamento ADR 1200S usado para quantificar a concentração mássica de PM <sub>2,5</sub> . ....                                                         | 31 |
| Figura 11: Instalação do monitor ADR 1200S na viatura usada nas campanhas de medição. ....                                                                         | 32 |
| Figura 12: Localização dos pontos na área de estudo e suas envolventes. ....                                                                                       | 33 |
| Figura 13: Média diária de humidade relativa e pluviosidade para o período global de avaliação. ....                                                               | 39 |
| Figura 14: Média diária de temperatura e radiação para o período global de avaliação. ....                                                                         | 40 |
| Figura 15: Rosa dos Ventos para o período global de avaliação. ....                                                                                                | 41 |
| Figura 16: Rosa de poluição para a média global das campanhas realizadas. ....                                                                                     | 43 |
| Figura 17: Distribuição interquartil e extremos das concentrações de PM <sub>2,5</sub> para cada campanha. ....                                                    | 44 |
| Figura 18: Média das concentrações de PM <sub>2,5</sub> para cada ponto em todas as campanhas realizadas. ....                                                     | 46 |
| Figura 19: Distribuição espacial das concentrações médias de PM <sub>2,5</sub> na Zona Industrial de Mirandela. ....                                               | 48 |
| Figura 20: Níveis diário de PM <sub>2,5</sub> para Zona Industrial. ....                                                                                           | 49 |
| Figura 21: Matriz de correlação de Pearson para PM <sub>2,5</sub> e variáveis ambientais. ....                                                                     | 50 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Principais poluentes e suas fontes de emissão.....                                                                                                                        | 18 |
| Tabela 2: Características dos movimentos das partículas em função do diâmetro aerodiâmico equivalente.....                                                                          | 20 |
| Tabela 3: Valores limite relativos a material particulado definidos no Decreto-Lei n.º102/2010 de 23 de setembro, Anexo XV e Anexo XII respectivamente.....                         | 25 |
| Tabela 4: Principais características dos locais de medição na zona industrial de Mirandela....                                                                                      | 33 |
| Tabela 4 (cont.): Principais características dos locais de medição na zona industrial de Mirandela.....                                                                             | 34 |
| Tabela 4 (cont.): Principais características dos locais de medição na zona industrial de Mirandela.....                                                                             | 35 |
| Tabela 5: Períodos (datas e horas) das campanhas de medição realizadas na Zona Industrial e sua envolvente. ....                                                                    | 36 |
| Tabela 6: Parâmetros estatísticos relativos a variáveis meteorológicas para cada campanha...41                                                                                      |    |
| Tabela 7: Parâmetros estatísticos relativos às concentrações de PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) para cada ponto de amostragem e para cada uma das campanhas realizadas. .... | 45 |

## ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

|                                   |                                                                              |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| <b>APA</b>                        | Agência Portuguesa do Ambiente                                               |
| <b>C<sub>6</sub>H<sub>6</sub></b> | Benzeno                                                                      |
| <b>CCDR</b>                       | Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional                          |
| <b>Cd</b>                         | Cádmio                                                                       |
| <b>CO</b>                         | Monóxido de carbono                                                          |
| <b>CO<sub>2</sub></b>             | Dióxido de carbono                                                           |
| <b>COV</b>                        | Compostos Orgânicos Voláteis                                                 |
| <b>Cu</b>                         | Cobre                                                                        |
| <b>EEA</b>                        | <i>European Environment Agency</i>                                           |
| <b>EI</b>                         | Ecologia Industrial                                                          |
| <b>GPS</b>                        | <i>Global Positioning System</i>                                             |
| <b>HPA</b>                        | Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos                                      |
| <b>Mn</b>                         | Manganês                                                                     |
| <b>NO<sub>2</sub></b>             | Dióxido de azoto                                                             |
| <b>NO<sub>x</sub></b>             | Óxidos de azoto                                                              |
| <b>O<sub>3</sub></b>              | Ozono                                                                        |
| <b>Pb</b>                         | Chumbo                                                                       |
| <b>PEI</b>                        | Parque Eco-Industrial                                                        |
| <b>PI</b>                         | Parque Industrial                                                            |
| <b>PM</b>                         | Material Particulado                                                         |
| <b>PM<sub>10</sub></b>            | Material Particulado com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 10 µm  |
| <b>PM<sub>2,5</sub></b>           | Material Particulado com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 2,5 µm |
| <b>PTS</b>                        | Partículas Totais em Suspensão                                               |
| <b>SI</b>                         | Simbiose Industrial                                                          |
| <b>SO<sub>2</sub></b>             | Dióxido de enxofre                                                           |
| <b>UE</b>                         | União Europeia                                                               |
| <b>USEPA</b>                      | <i>United States Environmental Protection Agency</i>                         |
| <b>VL</b>                         | Valores Limite                                                               |
| <b>WHO</b>                        | <i>World Health Organization</i>                                             |
| <b>ZI</b>                         | Zona Industrial                                                              |



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Os parques industriais (PI) ou as zonas industriais (ZI) constituem um espaço territorial, no qual se agrupam uma série de atividades industriais ou empresariais que podem estar relacionadas entre si. A concentração de atividades pode promover inovação, aprendizagem tecnológica e o crescimento das empresas. Além disso, as economias de escala de oferta de serviços e instalações reduz os custos para as empresas. Assim, os PI bem-sucedidos contribuem para o aparecimento de regiões mais desenvolvidas e economicamente mais fortes.

Apesar dos PI trazerem para a comunidade local melhorias económicas, podem ser a origem da degradação da qualidade do ambiente dos locais e das regiões em que se encontram instalados e, conseqüentemente, contribuirão para o aumento de problemas de saúde das populações vizinhas, uma vez que as questões ambientais nem sempre foram consideradas no planeamento dessas estruturas (UNEP/SEPA, 2001).

As questões ambientais mais problemáticas incluem a água, águas residuais, gestão de resíduos, ruído e qualidade do ar. Uma das grandes questões da atualidade é a exposição humana aos poluentes atmosféricos, pois todo ser humano tem direito a respirar um ar puro, sendo um fator determinante para a manutenção da vida. A poluição atmosférica apresenta grande risco à saúde, sendo o material particulado (PM) responsável no mundo por 3 milhões de óbitos anuais, com 88% destes observados em países de baixa ou média renda (WHO, 2016). Em Portugal, dados de 2014 da Agência Ambiental Europeia apontam que 6630 pessoas morreram, devido a problemas associados à má qualidade do ar, e desse número 3710 foram devidas as partículas finas.

As partículas na atmosfera podem ser formadas a partir de gases precursores (FUZZI *et al.*, 2015) ou emitidas diretamente na atmosfera. As partículas têm origem antrópica em atividades como de queima de biomassa, combustíveis fósseis, industriais e dentre outras. Também tem origem natural, pela emissão de spray marinho, pólen, por erupções vulcânicas, pela suspensão de poeira do solo pela ação do vento (SEINFELD & PANDIS, 1997).

Segundo a European Environmental Agency (EEA) (2017), o material particulado representa mais da metade do total de emissões de poluentes atmosféricos na Europa, e a

indústria é responsável por mais da metade de toda a emissão de partículas e dióxido de carbono.

A monitorização da qualidade do ar em zonas industriais é fundamental para se avaliar a exposição das populações, e para se proporem soluções que visem melhorar a qualidade do ar dos locais afetados pelas emissões das atividades que se desenvolvem nessas zonas.

Em Portugal, o Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro, introduziu objetivos de qualidade do ar ambiente, do qual foi transposto do decreto da União Europeia. A fim de atender a esses objetivos, projetos de reabilitação em zonas industriais foram criados para promover a proteção do ambiente, melhorar a eficiência e contribuir para estratégias de desenvolvimento sustentável. Este estudo tem caráter preliminar e foi realizado no âmbito do Projeto *Rehabind*, o qual tem o intuito de avaliar a qualidade ambiental de dois parques industriais em Mirandela-PT e Zamora-ES.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo central deste estudo é caracterizar os níveis de partículas finas inaláveis ( $PM_{2,5}$ ) na zona industrial de Mirandela-PT e sua envolvente, procurando-se avaliar a magnitude das suas concentrações, caracterizar as variações temporais e espaciais, inferir a contribuição relativa das principais fontes deste poluente e propor medidas de redução dos níveis de  $PM_{2,5}$ .

## 1.3 ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação está organizada em 6 capítulos.

No capítulo 1 apresenta-se uma breve contextualização do tema, assim como os principais objetivos.

O segundo capítulo aborda os conceitos e o processo evolutivo dos sistemas industriais, como simbiose industrial, metabolismo industrial e parques eco-industriais. Os tipos de desenvolvimentos que podem ser encontrados nos parques eco-industriais, oportunidades e desafios são também tratados.

O terceiro capítulo procura introduzir a problemática da poluição atmosférica e procura-se estabelecer a sua relação com as atividades das zonas industriais. Inicia-se o capítulo com uma apresentação das principais fontes de emissão de Material Particulado, dos

seus efeitos na saúde humana e no ambiente em geral. Em seguida, uma breve revisão bibliográfica sobre a qualidade do ar em diferentes zonas industriais. Finalmente, aborda-se alguns aspetos da gestão da qualidade do ar nessas zonas, com especial destaque para a monitorização e o enquadramento legal de Portugal.

No quarto capítulo descreve-se a metodologia, como os pontos escolhidos, instrumentação na amostragem de  $PM_{2,5}$  e parâmetros meteorológicos.

O quinto capítulo aborda os resultados obtidos após a metodologia aplicada e suas discussões sobre estes, juntamente com propostas de melhoria.

O sexto capítulo apresenta as conclusões obtidas com esse trabalho e por fim as referências utilizadas para auxílio na sua execução.



## 2. PARQUES ECO-INDUSTRIAIS

### 2.1 CONCEITOS E PROCESSO EVOLUTIVO

A intensificação da atividade humana em áreas específicas, como em parques industriais, coloca problemas do ponto de vista ecológico e ambiental, devido ao desenvolvimento económico dessas áreas. Neste sentido, estudiosos passaram a procurar alternativas capazes de promover o desenvolvimento económico em simultâneo com a preservação ambiental, surgindo um novo conceito no trabalho de Frosch & Gallopoulos em 1989, a “Ecologia Industrial (EI)”(CHERTOW, 2008; GEISSDOERFER, 2017).

A EI teve como país pioneiro o Japão no final da década de 1960, onde o governo de então estabeleceu uma política de suporte para que o país conseguisse diminuir a dependência de matérias-primas. Contudo, os estudos de Frosch & Gallopoulos, citados anteriormente, defenderam a possibilidade de melhorias nos métodos produtivos a partir da integração dos processos (ERKMAN, 1997).

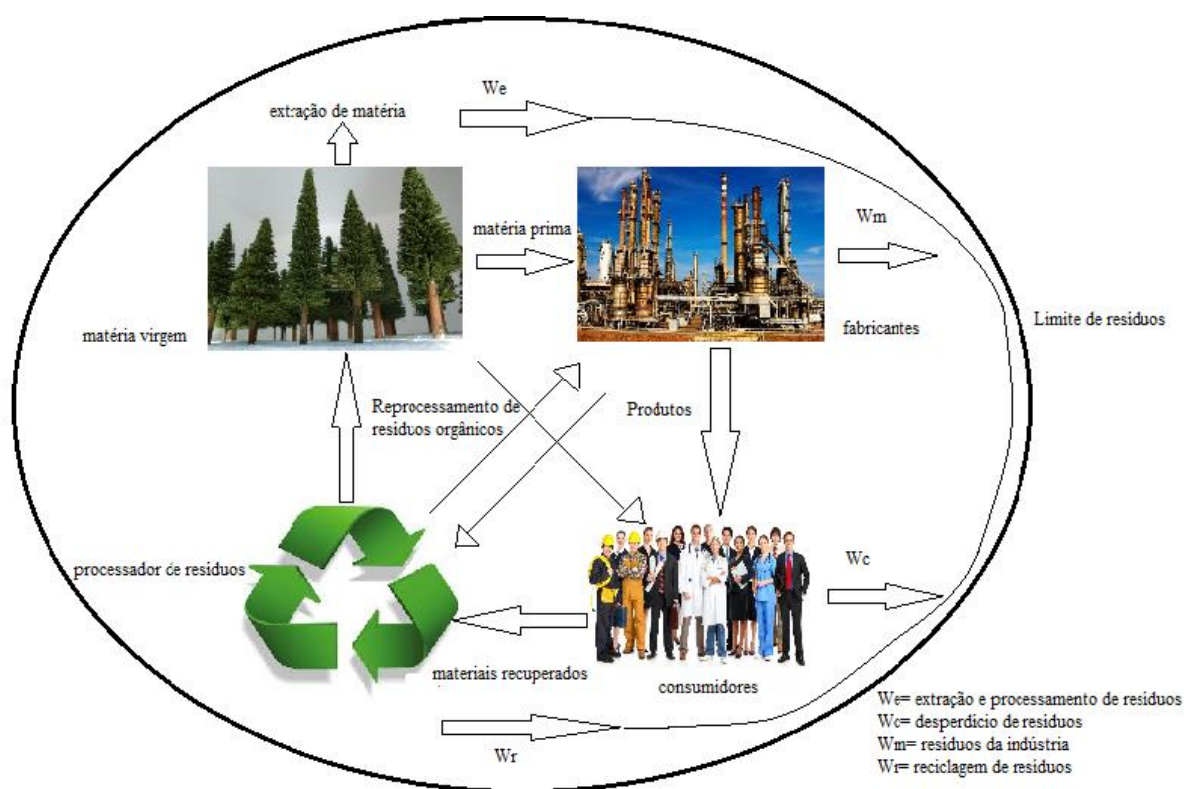
Em 1991, a *National Academy of Sciences* considerou a EI um novo campo de estudo. Em 1992, Braden Allenby defendeu a primeira tese de doutoramento sobre diversos pressupostos relacionados a EI. Em 1997, o *Journal of Cleaner Production* editou um número especial dedicado ao tema e no mesmo ano teve início a publicação do *Journal of Industrial Ecology* (ARAUJO, 2013).

A EI estuda a interação da indústria e o desenvolvimento ambiental e social em diferentes escalas visando aumentar o sucesso comercial, preservando o ambiente e levando em conta as comunidades vizinhas (FROSCH & GALLOPOULOS, 1989; CHERTOW, 2007). Vários autores como Chertow (2008) e Lifset & Graedel (2002) concordam que a ecologia industrial procura, numa primeira fase, entender como o sistema industrial funciona e quais são as suas interações com a biosfera, em seguida, determina de que forma este pode ser reestruturada para torná-lo compatível com o funcionamento dos ecossistemas naturais.

Erkman (1997) afirma que o foco deve estar centrado nos complexos fluxos de entrada e saída de materiais do sistema industrial e como estes afetam as atividades humanas. Além disso, considera as evoluções tecnológicas a longo prazo como um elemento crucial, mas não exclusivo, para a transição do sistema industrial insustentável para um ecossistema industrial viável.

Os objetivos que se procuram alcançar é a minimização na produção de resíduos e a conversão de subprodutos em produtos reutilizáveis ou recursos. A localização e integração de empresas que podem usar ou reprocessar o desperdício de outras indústrias na mesma localidade constituem metas para o sucesso da EI (ALLENBY, 1996).

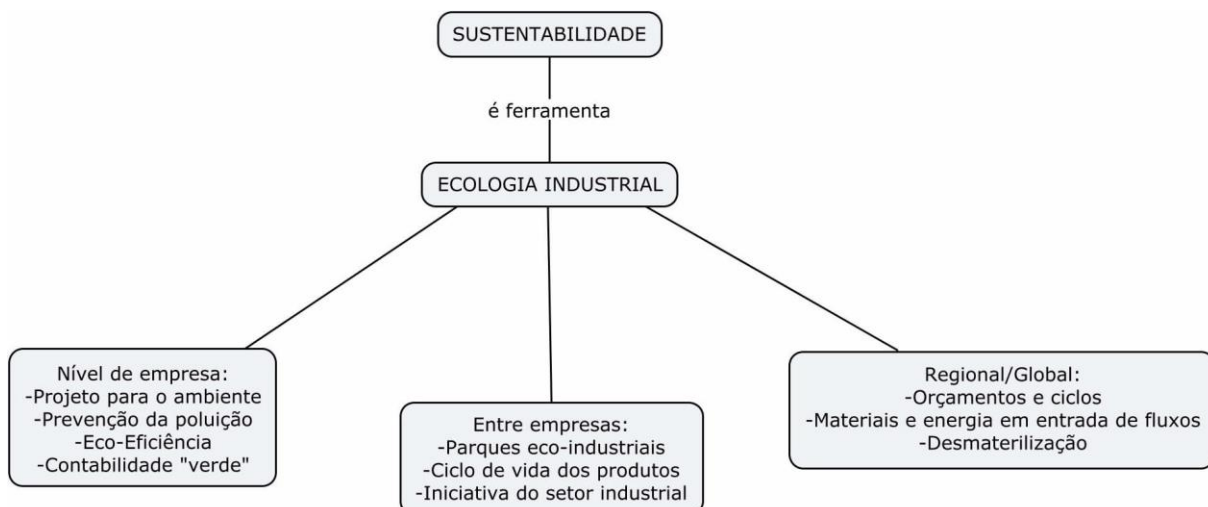
A Figura 1 exemplifica, com base num diagrama de Allenby (1999), a transformação e refinação dos recursos em produtos usados por outras indústrias ou vendidos aos consumidores, fazendo com que depois retornem como resíduos e subprodutos ao sistema de produção através da reciclagem, fechando o ciclo de vida do produto. Entretanto, ao longo deste ciclo, a energia e os materiais são perdidos para o meio, devido a ineficiências na conversão de recursos/produtos nos diferentes processos. Sendo essa a razão da dificuldade em “imitar” o nível de eficiência alcançada pelos ecossistemas naturais (ROBERTS, 2004).



**Figura 1: Fluxograma do funcionamento da Ecologia Industrial.**

Fonte: Adaptada Roberts (2004).

A EI pode operar em diferentes níveis: ao nível de empresa, entre empresas, local, regional e global, como ilustrado na Figura 2.



**Figura 2: Representação dos níveis da Ecologia Industrial.**

Fonte: Adaptada Lifset & Graedel (2002).

Portanto, a Ecologia Industrial é baseada numa visão mais holística, inserindo o sistema industrial num contexto amplo, avaliando as consequências a longo prazo, enquanto as abordagens tradicionais de gestão ambiental se focam apenas em processos individuais ou em unidades industriais isoladas (GERTLER, 1995).

Outro termo que surgiu neste âmbito foi o de Ecosistema Industrial utilizado pelo geoquímico americano Preston Cloud em 1977. Este autor defendeu ser muito lucrativo, e altamente desejável do ponto de vista ambiental, a utilização deste conceito. São fluxos de materiais que não se esgotam, mais do que aqueles num ecossistema biológico.

Os processos de fabricação num ecossistema industrial transformam as matérias primas em fluxo de materiais. Esse fluxo diminui quando algum material é inevitavelmente perdido e aumenta para atender as necessidades de uma população crescente. Essa reciclagem de material ainda envolve o gasto de energia, a geração de resíduos e a formação de subprodutos nocivos, mas em níveis muito mais baixos do que são típicos nos dias de hoje. Caso os países desenvolvidos e em desenvolvimento abraçassem as mudanças, seria possível desenvolver um ecossistema industrial mais fechado, no sentido de diminuir as necessidades de matérias-primas e os problemas de poluição (FROSCH & GALLOPOULOS, 1989).

Os dois conceitos caminham juntos para um único propósito: a melhoria da qualidade dos processos industriais. Os subtópicos a seguir buscam inserir nos sistemas industriais os princípios da Ecologia Industrial: a Simbiose Industrial (SI), Metabolismo Industrial e os Parques Eco – Industriais (PEI's).

### **2.1.1 Simbiose Industrial (SI)**

Segundo Dutra (2005), o conceito de “simbiose” refere-se às relações de espécies interespecíficas na natureza, que realizam trocas de matéria, energia ou ‘serviços’. O termo foi sendo utilizado a partir da década de 80 dentro da Ecologia Industrial, por ser uma ferramenta de aplicação a nível local.

Refere-se ao envolvimento de indústrias, tradicionalmente separadas, numa estratégia coletiva de partilha física de materiais, energia, água e subprodutos. A chave da simbiose industrial é a colaboração e as possibilidades sinérgicas oferecidas pela proximidade geográfica (CHERTOW, 2000). A concepção principal da SI é a transformação de resíduos ou subprodutos da atividade de uma empresa, em entradas de outro por meio de conexões entre eles.

Existem muitas motivações que levam as empresas a perseguirem a simbiose industrial, direta ou indiretamente, ela é utilizada para tentar cumprir outros objetivos. As principais motivações são as da visão de negócios, como a partilha de recursos, que pode reduzir custos e/ou aumentar as receitas. Entretanto, a sua utilização pode melhorar a longo prazo a segurança de recursos, aumentando a disponibilidade de recursos críticos, tais como água, energia, ou matérias-primas particulares por meio de contratos. Algumas empresas buscam a simbiose em resposta à pressão regulatória ou para aumentar a eficiência do uso de recursos, redução de emissões, ou a eliminação do desperdício (CHERTOW, 2007).

A pequena cidade de Kalundbog na Dinamarca, é o exemplo mais conhecido de simbiose industrial em ação. Surgiu a partir da auto-organização iniciada no setor privado para alcançar melhorias no seu sistema industrial, como o aproveitamento do fluxo de matéria e poupança energética. Numa fase inicial, este caso de simbiose industrial não foi visualizado do lado de fora pela população, porque as trocas surgiram a partir da invisível mão do mercado em vez do envolvimento direto das instituições governamentais. Depois, numa etapa posterior, a função de coordenação foi criada para ser útil na organização de mais trocas, dando-lhe um forte impulso (CHERTOW, 2007).

Outro exemplo de aplicação de SI, segundo Buström (2001), é a produção de resíduos sólidos e sua redefinição como inputs para outros processos. O facto de serem agregados com valor económico, faz com que o seu uso no fluxo aumente, diminuindo custos para descartá-los, e em simultâneo, minimizando impactes ambientais e incrementando lucros para

participantes individuais nas empresas. Numa ampla escala pode haver potencial de criação de emprego e uma base económica variada na área.

O conceito chave é que os processos e as indústrias são vistos como uma interação de sistemas, ao contrário de incluir componentes isolados num sistema de fluxos. Isso fornece uma base para pensar sobre formas de conectar diferentes resíduos, processos, instalações ou indústrias numa rede operacional que minimiza a quantidade total de material industrial. O foco é minimizar o desperdício de um determinado processo ou instalação (prevenção da poluição), diminuindo o produzido pelo sistema como um todo, e reduzir a entrada de matéria-prima (RICHARDS *et al.*, 1994; BRAND & BRUIJN, 1999).

Portanto, o primeiro passo é uma melhor compreensão desses fluxos de materiais, para aumentar a ecoeficiência do metabolismo de uma sociedade (DEN HOND, 2000).

### **2.1.2 Metabolismo Industrial**

Como já foi citado nos tópicos anteriores, Metabolismo Industrial é um conceito que emerge assente em analogias entre sistemas económicos e ecológicos (LEVITT, 1965; GOMEZ *et al.*, 2018).

Todos os organismos superiores possuem um ciclo de vida, que começa com o nascimento, atravessa a adolescência, a maturidade, a senilidade e termina com a morte. Esta analogia pode ser aplicada aos produtos, empresas e indústrias. Os sistemas são caracterizados em ingestão, digestão, excreção, reprodução e crescimento. Sendo a ingestão correspondente ao uso de matérias-primas, a digestão ao processamento primário e à separação de resíduos, a excreção corresponde à eliminação de resíduos, a reprodução pode ser interpretada como a produção em massa de um produto, enquanto o crescimento obviamente se aplica a empresas e economias (AYRES, 1989).

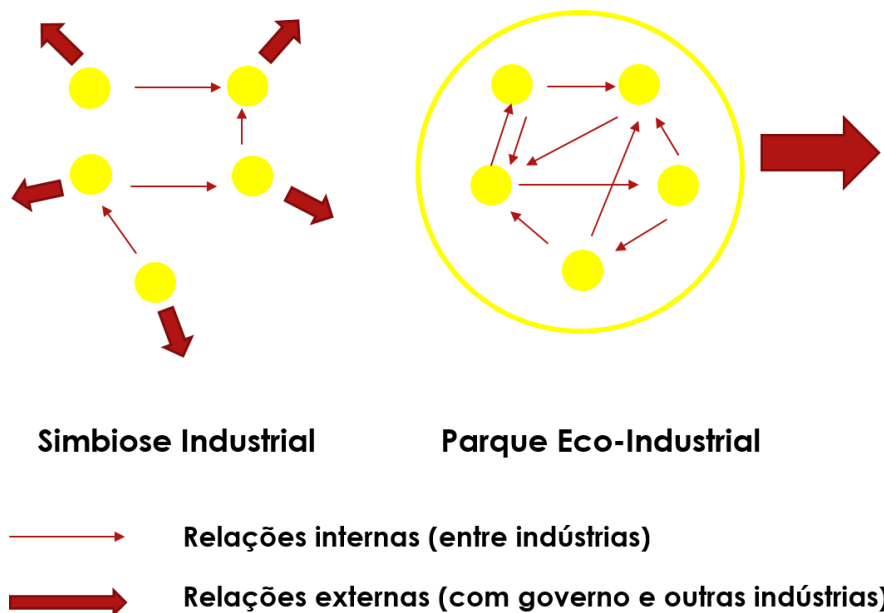
Num ecossistema industrial, efluentes e resíduos de um processo servem como material de entrada para outros processos ou são reciclados para uma produção posterior, mimetizando redes alimentares em sistemas naturais, característica do conceito de metabolismo industrial (DUNN & STEINEMANN, 1998; FAN *et al.*, 2017). A maioria dos estudiosos percebe que a visão de um sistema “perfeito” está longe de ocorrer (KORHONEN, 2002), mas acreditam que vale a pena perseguir esse objetivo, através de uma política ambiental e de uma gestão ambiental industrial (ALLENBY, 1999).

### **2.1.3 Parques Eco-Industriais (PEI's)**

Os Parques Eco- Industriais (PEI), são considerados a “realização concreta do conceito de simbiose industrial”. A sua definição começou a ser desenvolvida na década de 1990 a partir dos conceitos de EI e SI (CHERTOW, 2000). Chertow (1999), num outro estudo, afirmou que os PEI's são uma parte da simbiose industrial, destacando-se como uma característica fundamental desta. Os parques industriais fazem parte do nível em que a ecologia industrial opera entre empresas, como foi mostrado na Figura 2.

São classificados em PEI as situações em que as empresas que se relacionam entre si estejam intimamente conectadas e trabalhem constantemente nas suas inter-relações, estreitando cada vez mais os seus laços ao longo do tempo. As empresas devem compartilhar materiais, energia ou infraestruturas como um SI, podendo desenvolver estruturas verdes, procurando melhorias ambientais, económicas e desempenho social, através de colaborações a nível da gestão do ambiente e dos recursos naturais (LOWE, 2001; BELLANTUONNO, 2017).

A diferença entre PEI e SI é o facto de o primeiro ser um conceito mais complexo e abrangente. O desenvolvimento de parques industriais ecológicos passa pela aplicação de conceitos e práticas já testados, porém num novo sistema (LOWE, 2001). Enquanto a simbiose industrial pode acontecer através de algumas ações isoladas, as empresas não se conectam efetivamente, não precisam necessariamente compartilhar o mesmo espaço físico. Os Parques Eco- Industriais possuem relações mais fechadas, dentro de fronteiras definidas e formam uma unidade. A figura 3 mostra as diferenças entre PEI's e SI.



**Figura 3: Ilustração esquemática das diferenças entre a Simbiose Industrial e Parque Eco-Industrial.**

Fonte: Adaptada Ruiz (2013).

Os objetivos principais de um PEI são: melhorar o desempenho de todas as empresas que participam e minimizar os impactos que elas mesmas geram. Além de incluir a prática do conceito de simbiose industrial deve aplicar também conceitos de design verde na infraestrutura, produção limpa, prevenção de poluição, eficácia energética e, além disso, trazer benefícios para as comunidades vizinhas (LOWE, 2001). São organizados de modo a facilitar a comunicação entre as empresas envolvidas, para tornar flexível a aplicação da SI tanto internamente entre as indústrias como externamente com o poder local, regional ou central. Além disso, os PEI's possuem mais poder de persuasão em qualquer processo de negociação com o poder político. O facto de transmitirem um “marketing verde” também facilita as negociações com outras empresas que compartilham do mesmo ideal (SAIKKU, 2006).

Saikku (2006) estabelece os pontos principais que os PEI's precisam apresentar para obterem êxito, porém deixa claro que não existe uma receita a ser seguida para o seu desenvolvimento, pois há muitas abordagens que dependem de seu objetivo e situação. Têm sido implementados com sucesso vários os projetos de Parques Eco- Industriais em vários países desenvolvidos e em desenvolvimento e a tendência é esse número continuar a aumentar. Em Portugal, destacam-se dois Parques Eco- Industriais, o Ecoparque de Estarreja, em Aveiro, e o Ecoparque do Relvão, na Chamusca.

## 2.2 TIPOS DE DESENVOLVIMENTO ECO-INDUSTRIAL

Os desenvolvimentos ecos-industriais podem apresentar três modelos segundo Roberts (2004): modelo de firma (micro-nível); modelo de Parques Eco-Industriais (médio-nível); modelo de Parque Eco-Industriais em sistemas em rede (macro-nível).

O modelo firma consiste na aplicação da EI a empresas, podendo alcançar economias operacionais significativas. No entanto, podem ser limitados quanto à escala e qualidade dos resíduos ou subprodutos de materiais que afetam os custos de recuperação.

O próximo modelo, os Parques Eco-Industriais de nível médio funcionam como catalisadores para desenvolvimentos imobiliários voltados para ideias de EI, limpeza, produção e valor agregado a gestão de resíduos incentivando ambiente e técnicas sustentáveis onde compartilham estrutura e matéria-prima como já foi comentado anteriormente. Dentro desse mesmo modelo de desenvolvimento encontram-se os parques industriais verdes, contêm uma variedade de empresas que aplicam tecnologias de produção mais limpas, processam parte de seus resíduos e reduzem emissão de gases de efeito estufa, os “conscientes do meio ambiente” (ROBERTS, 2000; DANGELICO & PONTRANDOLFO, 2010).

Entretanto, mesmo que possuam práticas sustentáveis, não recebem incentivos para o agrupamento das indústrias e aproveitamento das suas sinergias. Além disso, ainda dentro do segundo modelo, os Parques Eco-Industriais integrados concebidos para o desenvolvimento de ecologias centradas em cluster industriais (aglomerados), podem variar de um complexo contendo vários núcleos como exemplo o de Kalundborg, a um cluster simples onde compartilham serviços comuns (ROBERTS, 2000).

O terceiro modelo de desenvolvimento são os parques Eco-Industriais em sistemas de rede que apresentam um nível macro de desenvolvimento com alianças e vínculos estratégicos com outros PEI's em regiões metropolitanas ou globais (ROBERTS, 2000).

Chertow (2000), no seu estudo de oito Parques Eco-Industriais, definiu cinco diferentes modelos de desenvolvimento. O primeiro modelo é definido como troca de materiais, em vez de água ou energia. As trocas desse tipo não são mais estudadas porque estão mais distantes da definição de simbiose industrial. O segundo modelo tem características como trocas entre setores da própria organização considerando todo o ciclo de vida de produtos, processos e serviços, incluindo operações a montante, como compras e design de produtos. No terceiro modelo as trocas são realizadas entre organizações que podem

ou não estar dentro de um parque industrial, compartilhando energia, água e materiais. O quarto modelo é o exemplo de Kalundborg, não foi projetado para ser um parque industrial, ou seja, não tendo uma área definida, mas pela proximidade há trocas de material, água, energia e fluxos.

O quinto e último modelo, classificado por Chertow (2000), é baseado em ligações virtuais e não em relação a localização geográfica, permitindo uma expansão da simbiose industrial sendo um atrante adicional para este modelo.

### 2.3 PRINCIPAIS ASPETOS AMBIENTAIS DAS ZONAS INDUSTRIAIS

A sociedade não quer abrir mão de conforto material como uso de combustíveis, energia e bens materiais (HAWKEN, 1999). Além disso, o aumento exacerbado da população e das áreas urbanas têm contribuído para o crescimento de impactos ambientais negativos. Como consequência, o elevado consumo de produtos industrializados, a elevada necessidade de água, a elevada produção de resíduos e emissão de poluentes são os responsáveis pelas alterações e impactos ambientais, sendo essas alterações que comprometem os ecossistemas (MUCELIN, 2008).

Fronzizi (1996) afirma que a poluição é sinónimo de desperdício e ineficiência produtiva, e complementando esse pensamento, Valle (1995) coloca que os resíduos industriais representam na maioria dos casos, perdas de matéria-prima e insumos.

Os impactos ambientais podem ser classificados de acordo com o campo que afetam, como solo, ar e água. Os resíduos sólidos gerados pelas indústrias constituem uma das principais formas de degradação do ambiente. Além do acréscimo na quantidade, os resíduos produzidos atualmente passaram a integrar na sua composição elementos sintéticos e perigosos para os ecossistemas e a saúde humana, em virtude das novas tecnologias incorporadas no quotidiano (FERREIRA, 2001).

Diante da problemática em torno da produção e gestão de resíduos, chegou o momento de o setor industrial incorporar, com mais eficiência, a sustentabilidade em todas as suas rotinas de trabalho, em especial no que diz respeito à adoção de processos produtivos menos agressivos para o ambiente.

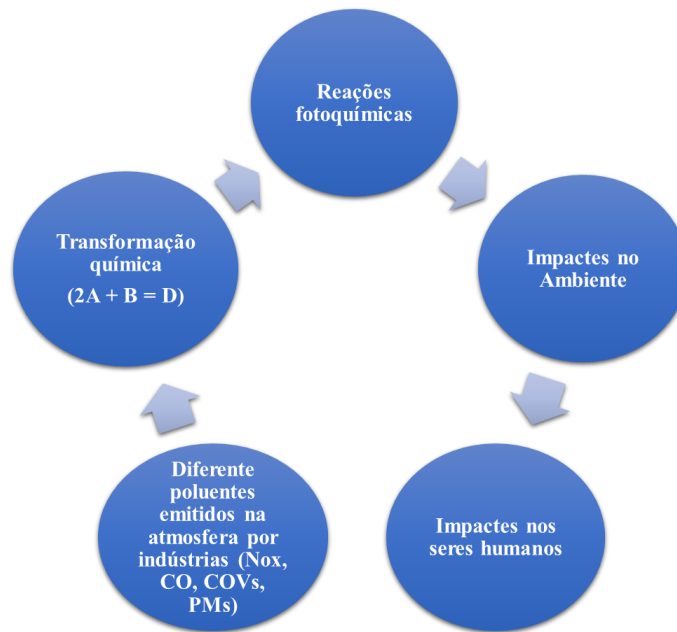
Os resíduos líquidos ou mais conhecidos como águas residuais/efluentes são considerados um dos principais responsáveis pela poluição causada pelas indústrias. Em

diversos processos de operação e processos de higienização, em descartes e descargas, vazamentos e derramamentos. O grau de contaminação dos efluentes depende da natureza das indústrias e do seu sistema de gestão de resíduos (SILVA, 2011).

Existem muitas maneiras de realizar o tratamento destes, desde técnicas com custos mais baixos a técnicas com custos mais elevados e mais eficazes, como várias biotecnologias utilizadas no tratamento de efluentes de indústrias alimentares, de resíduos agrícolas e agroindustriais e resíduos derivados de petróleo (SPICER, 1971; ROMERO & RUIZ, 2014).

A emissão de poluentes para a atmosfera, gasosos e particulados, pelas atividades industriais, tem sido outro dos problemas mais preocupantes. A era industrial tem contribuído para a redução da capacidade de autodepuração do ambiente e da atmosfera terrestre. Na metade do século XX, as cidades industrializadas do ocidente apresentaram episódios de “*smog*” (neblina amarelo-acastanhada e de odor desagradável), decorrente da interação química entre os diferentes poluentes do ar. Mesmo assim, o mundo globalizado continuou a exigir um contínuo fornecimento de energia, fazendo com que a disponibilidade dos recursos naturais chegasse ao limite. Esse facto, aliado a uma nova visão da sociedade sobre o ambiente, tem favorecido pesquisas em busca de combustíveis alternativos, menos poluidores, juntamente com a pressão da sociedade para uma diminuição dessa poluição e um possível aumento do efeito-estufa.

É a partir desses fatores que a exposição humana a essas emissões se tornou atualmente uma das grandes questões, pois respirar ar puro deveria ser um requisito básico de vida e um fator determinante da saúde. O capítulo 3 expõe situações de degradação da qualidade do ar e os efeitos dela para a saúde humana (BAIRD, 2002). A Figura 4 ilustra a sequência de transformação dos poluentes, desde a sua emissão até sua disponibilidade na atmosfera.



**Figura 4: Sequência de transformação dos poluentes atmosféricos na atmosfera.**

## 2.4 OPORTUNIDADES E DESAFIOS

Lowe (2001) e Chertow (2005) destacaram, em alguns estudos que desenvolveram, as vantagens e oportunidades da implementação de PEI's e a adequação das empresas a comportamentos mais sustentáveis, a redução de custo da produção pela utilização de matéria-prima reciclada, o aumento da receita tributária com a venda de subprodutos, a utilização de serviços compartilhados reduzindo custos na produção, a diminuição de descartes de resíduos e melhoria na eficiência energética, criando uma imagem mais favorável perante a sociedade, no mercado nacional e internacional e na competitividade (o conhecido “marketing verde”).

O uso de tecnologias sustentáveis e matéria-prima de baixo impacto ambiental faz com que a empresa tenha um fortalecimento da economia aliada a projetos sociais (programas profissionalizantes e de treinamentos, educacionais e culturais, atividades comunitárias).

Mesmo com tantas vantagens e oportunidades na implementação dos PEI's, as zonas industriais encontram muitos desafios: a falta de ações do governo como o incentivo no intercâmbio de subprodutos e regulamentos que devem tornar-se mais flexíveis, de modo a não prejudicar indevidamente a reciclagem e outras estratégias para minimização de resíduos. Distância entre os parceiros que tendem a elevar os custos do transporte do subproduto. Pelo

reaproveitamento de produtos em seus processos podem passar uma imagem de qualidade inferior nos produtos (TANIMOTO, 2004; POMPONI & MANCASTER, 2014).

### 3. QUALIDADE DO AR EM AMBIENTES INDUSTRIAIS

#### 3.1 VISÃO EM GERAL

O rápido processo de industrialização e urbanização observado nas últimas décadas no mundo trouxe consigo vários problemas para a população e um deles é a degradação da qualidade do ar (WHO, 2006). A qualidade do ar define-se como o estado em que se encontra o ar que respiramos (BRAGA, 2002). Os poluentes presentes nesse ar podem ser descritos como todo contaminante, que modifica as características físico-químicas, de forma não consentânea com os níveis estabelecidos na legislação. Dependendo dos tipos de fontes e condições meteorológicas locais o ar torna-se impróprio e nocivo para a saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade (SEINFELD, 1975; VALENTINO *et al.*, 2016).

A qualidade do ar ambiente é afetada principalmente por poluentes gasosos como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>) e por partículas sólidas ou líquidas suspensas no ar (FUZZI, 2015; GUO, 2017).

As fontes de emissão desses poluentes atmosféricos são vastas: indústrias, transportes, agricultura, gestão de resíduos e habitações. A contribuição das atividades humanas para a formação de poluentes atmosféricos é geralmente mais fácil de medir e controlar do que o das fontes naturais.

Segundo Loureiro (2005), os poluentes atmosféricos podem ser divididos em dois grandes grupos: poluentes primários e poluentes secundários. Os primários são emitidos diretamente pelas fontes, como exemplo: o monóxido de carbono (CO), o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>) e material particulado (PM) de diferentes tamanhos e múltiplas composições oriundos de construções, estradas de terra, plantações, queimadas ou, pela interação com compostos pré-existentes na atmosfera (RESENDE, 2007; KONIECZYŃSKI *et al.*, 2012). Estes poluentes podem sofrer transformações e reações, as quais dão origem a poluentes denominados secundários (particulados e gasosos), como o ozono (O<sub>3</sub>) (BRAGA, 2005).

### 3.2 FONTES DOS PRINCIPAIS POLUENTES ATMOSFÉRICOS

As fontes dos principais poluentes atmosféricos podem ser classificadas em fontes fixas e móveis. O maior representante das fontes fixas são as indústrias por terem o maior potencial poluidor, emitindo diversos poluentes nas suas diferentes etapas de produção. O sector industrial utiliza uma variedade de matérias-primas que, durante a sua transformação em produtos acabados, descartam para a atmosfera parte de seus resíduos, como por exemplo as indústrias de petróleo, as indústrias de produtos químicos e indústrias metalúrgicas (GOMES, 2011). Em Portugal as indústrias alimentares, veiculares, elétrica, têxteis e vestuário se destacam perante os outros sectores (INE, 2012). As fontes móveis representadas por automóveis, aviões, comboios e embarcações marítimas (VALLERO, 2008).

A tabela 1 resume a classificação das fontes de emissão para os principais poluentes atmosféricos.

**Tabela 1: Principais poluentes e suas fontes de emissão.**

| <b>Poluentes</b>                      | <b>Principais Fontes de Emissão</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> ) | <b>Fontes naturais:</b> atividade vulcânica.<br><b>Fontes antropogénicas:</b> queima de combustíveis fósseis (setor da produção de energia, e de diversos processos industriais, podendo também ser emitido em pequenas quantidades pelos veículos a diesel).                                                                                                                         |
| Óxidos de azoto (NO <sub>x</sub> )    | <b>Fontes naturais:</b> transformações microbianas nos solos e descargas elétricas na atmosfera.<br><b>Fontes antropogénicas:</b> queima de combustíveis a altas temperaturas, quer em instalações industriais, quer nos veículos automóveis. Na maior parte das situações, o NO emitido para a atmosfera é posteriormente transformado em NO <sub>2</sub> por oxidação fotoquímica.  |
| Monóxido de Carbono (CO)              | <b>Fontes naturais:</b> erupções vulcânicas e decomposição da clorofila.<br><b>Fontes antropogénicas:</b> fogos florestais, combustão incompleta de combustíveis fósseis ou outros materiais orgânicos, sendo os transportes rodoviários o setor que mais contribui para as emissões deste poluente. Pode também ser formado por oxidação de poluentes orgânicos, tais como o metano. |
| Partículas em Suspensão (PM)          | <b>Fontes naturais:</b> vulcões, aerossóis marinhos e a ação do vento sobre o solo.<br><b>Fontes antropogénicas:</b> queima de combustíveis fósseis, processos industriais e tráfego rodoviário.                                                                                                                                                                                      |
| Ozono Troposférico (O <sub>3</sub> )  | Resulta de um conjunto de reações fotoquímicas complexas, envolvendo compostos orgânicos voláteis, óxidos de azoto, oxigénio e radiação solar. É um dos principais constituintes do nevoeiro fotoquímico.                                                                                                                                                                             |

Fonte: Adaptada APA (2012).

As fontes naturais de PM são geralmente constituídas por partículas minerais, com composição química e mineralogia que em geral são constituídas por silicatos – quartzo, argila, ilite e feldspato, carbonatos (calcite e dolomite), óxidos de ferro e em pequenas quantidades, sulfato de cálcio e óxidos de ferro. Estas contribuições de poeiras minerais para as partículas atmosféricas podem resultar da suspensão local de solos áridos ou do transporte a longas distâncias a partir de regiões áridas, atividades vulcânicas, sal marinho que são consequência do rebentamento de bolhas de ar nas cristas espumosas das ondas, pólenes produzidos pela vegetação e fontes esporádicas de PM, que permanecem por longos períodos na atmosfera pela característica de tamanho das partículas que se concentram na fração fina (ALMEIDA, 2004; TORRES, 2008; EEA, 2012).

As partículas finas primárias retratadas no capítulo 3.3.1, são emitidas na atmosfera majoritariamente por fontes de alta temperatura. As secundárias são formadas a partir da conversão gás-partículas, na qual participam precursores gasosos como, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, amônia e Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) emitidos por fontes naturais ou antropogênicas (FUZZI, 2015). Por outro lado, as partículas grossas têm sua origem a ruptura mecânica e o desgaste de materiais como a suspensão do solo (HARRISON *et al.*, 2001).

### 3.3 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E EFEITOS DO MATERIAL PARTICULADO (PM)

O material particulado (PM) tem sido estudado com maior frequência nos últimos anos, por afetar a saúde e os ecossistemas (LEE *et al.*, 2009). É conhecido por ser um conjunto de partículas sólidas e/ou gotículas líquidas que estão suspensas no ar, podendo algumas partículas serem grandes e escuras, portanto visíveis como a fumaça ou fuligem, ou então pequenas partículas que somente podem ser vistas com recurso a microscópio (SEINFELD & PANDIS, 1997; KONIECZYŃSKI *et al.*, 2012).

O PM é uma mistura complexa de substâncias orgânicas (nitratos, sulfatos, sais de amônio, carbono orgânico e elementar) e inorgânicas. Pode conter elevadas concentrações de metais de interesse toxicológico como cobre (Cu), níquel (Ni), manganês (Mn), chumbo (Pb) e cádmio (Cd) (WHO, 2000). Além de metais pesados, como compostos microbianos e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) (WHO, 2009).

O comportamento das partículas na atmosfera depende do seu tamanho, o qual pode variar 0,001 a 500  $\mu\text{m}$ , mas os tamanhos dominantes estão compreendidos entre os 0,1 a 10  $\mu\text{m}$ . Quanto menor a partícula, maior o tempo de suspensão no ar, partículas maiores se depositam rapidamente no solo (CARVALHO, 2003; KÜNZLI *et al.*, 2010). A Tabela 2 mostra a característica do movimento das partículas em razão de seu tamanho.

**Tabela 2: Características dos movimentos das partículas em função do diâmetro aerodinâmico equivalente.**

| Diâmetro ( $\mu\text{m}$ ) | Características do movimento                               |
|----------------------------|------------------------------------------------------------|
| < 0,1                      | Movimento aleatório similar às moléculas dos gases         |
| 0,1-20                     | Partículas seguem o movimento do gás no qual se encontram. |
| > 20                       | Partículas que se depositam facilmente.                    |

Fonte: Adaptada CARVALHO & LACAVA (2003).

A remoção de partículas da atmosfera pode ocorrer por deposição seca (transferência direta da atmosfera para a superfície) ou por deposição húmida (transferência por ação de hidro meteoros como as gotas da precipitação) (SEINFELD & PANDIS, 2016).

### 3.3.1 Classificação do Material Particulado (PM)

As PM podem ser classificadas quanto à dimensão do seu diâmetro aerodinâmico equivalente, termo usado para definir as propriedades aerodinâmicas das partículas, é definido como sendo o diâmetro de uma esfera equivalente com densidade unitária que tem a mesma velocidade terminal que a partícula em questão sob ação da gravidade (GIERAY, 1993) (Figura 5):

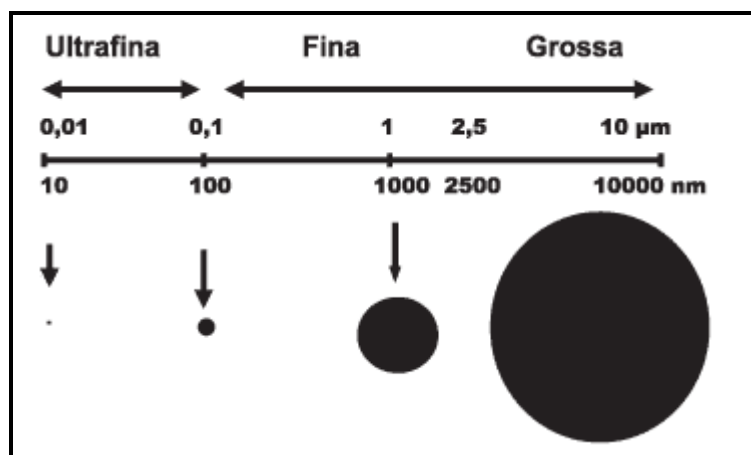
a) Partículas totais em suspensão (PTS): Todas as partículas com diâmetro menor que 100  $\mu\text{m}$ .

b) Partículas grosseiras inaláveis ( $\text{PM}_{10}$ ): Partículas que possuem tamanhos entre 2,5 e 10  $\mu\text{m}$ . Atingem a parte superior do sistema respiratório e ficam suspensas na atmosfera por algumas horas.

c) Partículas finas inaláveis ( $\text{PM}_{2,5}$ ): Partículas com diâmetro inferior a 2,5  $\mu\text{m}$  são geradas principalmente pela queima de combustível fóssil por veículos e pela queima de

biomassa por indústrias. Além disso, podem ficar suspensas no ar por dias ou até mesmo semanas, sendo muitas vezes, carregadas para regiões mais distantes.

d) Partículas ultrafinas inaláveis: Partículas com tamanho menor que 0,1  $\mu\text{m}$  podem entrar no corpo humano através da pele, pulmão e trato gastrointestinal e podem penetrar nas células epiteliais e se acumular nos gânglios linfáticos (CETESB, 2005; KÜNZLI, 2010).



**Figura 5: Classificação das partículas em função do diâmetro aerodinâmico equivalente.**

Fonte: Adaptada de Donaldson (2001) apud Arbex *et al.*, (2004).

### 3.3.2 Concentrações Típicas de Material Particulado

As fontes emissoras de origem antrópica são variadas destacando-se as atividades industriais, tráfego automóvel, queima de biomassa ou de combustíveis fósseis, em particular os sólidos. Estudo feito em diversas cidades da Europa relataram que os valores de PM excederam o limite de qualidade do ar principalmente por emissão do tráfego rodoviário e queima de biomassa (EEA, 2010). A EEA (2015) reporta valores médios anuais de  $\text{PM}_{2,5}$  para algumas cidades europeias como Paris ( $18,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Berlim ( $15,54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e Amsterdão ( $17,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Quando comparados com cidades chinesas são extremamente baixos, pois variam de  $68\text{-}273 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Portugal apresenta altos níveis de emissões de  $\text{PM}_{10}$  (partículas inaláveis), e as fontes responsáveis representam cerca de 33% do total das emissões. Essas caracterizadas por pequenas indústrias e sistemas de aquecimento residenciais. Sendo as emissões distribuídas por todo território português (TORRES *et al.*, 2018). A matéria particulada tem origem de diversas fontes, mas o tráfego rodoviário e os processos industriais são os mais relevantes para

PM<sub>2,5</sub> (GAO *et al.*, 2016). Torres et al., (2018) afirma em seu estudo que as maiores concentrações de PM<sub>2,5</sub> estão localizados na região do Alentejo e Lisboa metropolitana. E em comparação com as outras regiões do país, a concentração aumentou com o passar dos anos no período de estudo de 2009-2015.

### **3.3.3 Material Particulado e seus Efeitos no Homem e no Ambiente**

#### **Saúde**

Estudos relacionados com os efeitos da poluição atmosférica na saúde demonstraram associação entre a exposição ao material particulado e efeitos principalmente no sistema respiratório e circulatório. A fração fina do material particulado tem facilidade em penetrar no trato respiratório humano acumulando-se nas vias respiratórias superiores, causando doenças respiratórias como asma, rinite, obstrução nasal, tosse, laringoespasma e disfunção de cordas vocais. O perigo não decorre somente do tamanho das partículas, mas também da sua composição química e do local do corpo humano onde são depositadas (SHUSTERMAN *et al.*, 2011).

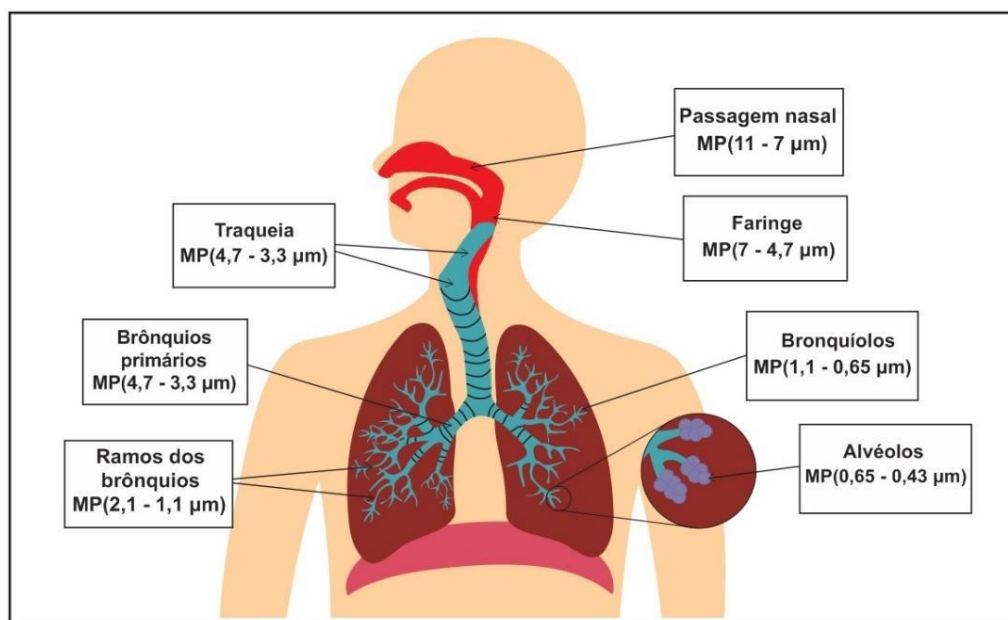
Os grupos mais suscetíveis à exposição aos poluentes atmosféricos são as crianças, porque apresentam um metabolismo basal mais acelerado do que o dos adultos e realizam atividade física com mais frequência. Gestantes e idosos também sofrem efeitos nocivos quando expostos a PM, pois apresentam um sistema imunológico menos efetivo (ARBEX *et al.*, 2012).

Outro grupo susceptível às doenças induzidas por PMs são os portadores de doenças crônicas pré-existentes no sistema respiratório (asma e fibroses) e circulatório (arritmias, hipertensão e doenças isquêmicas do coração), além da categoria na qual se enquadram doenças crônicas, como a diabetes e doenças do colágeno (ARBEX *et al.*, 2012).

O relatório de 2018 da WHO apresentou dados alarmantes, onde nove em cada dez pessoas respiram ar poluído contendo elevados níveis de poluentes atmosféricos. Segundo o organismo mundial sete milhões de pessoas morrem por ano pela exposição a contaminação presente no ar ambiente. E desse montante, mais de 90% das mortes relacionadas com a poluição do ar ocorrem em países de baixo e médio rendimento, principalmente na Ásia e na África, seguidos por nações de nível similar de distribuição de riquezas no Mediterrâneo Oriental, na Europa e nas Américas. Ainda neste relatório, a WHO apontou que a poluição do

ar é um fator de risco crítico para doenças crônicas não transmissíveis, provocando quase um quarto (24%) das mortes por doenças cardíacas, 25% dos óbitos por acidentes vasculares cerebrais, 43% por doença pulmonar obstrutiva crônica e 29% por cancro de pulmão.

A Figura 6 mostra como os PM se depositam seletivamente no organismo humano, através das vias respiratórias.

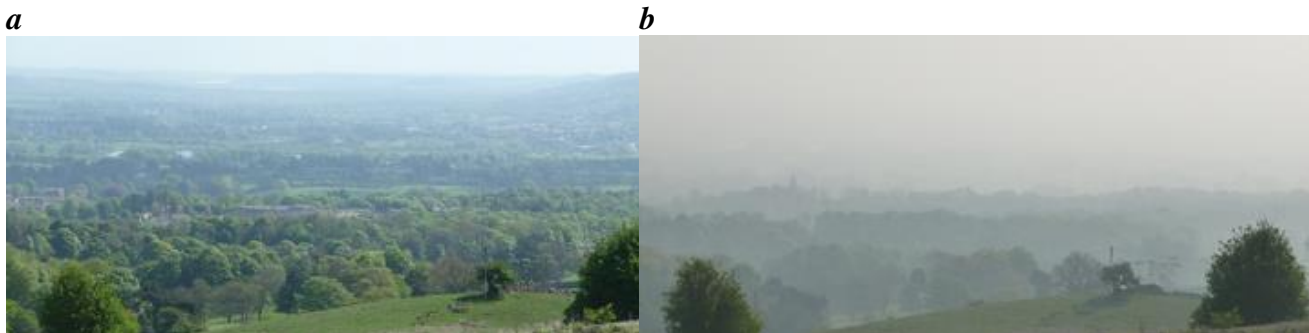


**Figura 6: Deposição de material particulado no sistema respiratório humano.**

Contudo, para a realização de um estudo da exposição humana, vários fatores considerados como: características da população, faixa etária, tipo de atividade que exerce, local onde vive, padrões de atividade diários distintos, poluentes que estão presentes, as fontes que são emitidos (fixas ou móveis) e tamanho em área (LISBOA, 2014).

### **Visibilidade**

Resende (2007) define a visibilidade como o grau de transparência da atmosfera para a luz visível. A redução de cores na atmosfera altera a claridade, o campo de visão e o contraste. Por consequência, há a perda de visibilidade que é agravada ainda mais por partículas finas (entre 0,1 e 1,0 µm) (RESENDE, 2007). A Figura 7 mostra a influência da poluição atmosférica na visibilidade da atmosfera numa mesma paisagem.



**Figura 7: Visibilidades atmosférica no mesmo local em momentos distintos: a) atmosfera limpa e b) atmosfera com elevada densidade de partículas em suspensão.**

Fonte: COMET (2016).

### **Clima/Ambiente**

O material particulado atmosférico tem influência direta no clima do planeta através da sua capacidade de dispersão e absorção da radiação solar e, indiretamente, porque pode atuar como núcleo de condensação nos processos de formação de nuvens (RAMANATHAN *et al.*, 2007).

Martins (2006) também afirma que os aerossóis estão ligados ao sistema climático e ao ciclo hidrológico, e que as incertezas sobre esse tema estão ligadas à concentração, distribuição de tamanho, composição e fonte de emissão. Considera que o aumento da concentração dos aerossóis e a mudança na sua composição pode afetar o sistema climático da Terra e até o suprimento de água.

As PM influenciam o ambiente em que vivemos, são responsáveis pela acidificação dos sistemas aquáticos e terrestres e causam lesões nas plantas (DGA, 2000). Além disso, ainda provocam corrosão em edificações pela sua deposição e composição química (RESENDE, 2007).

### **3.4 ENQUADRAMENTO LEGISLATIVO**

A qualidade do ar é uma das áreas ambientais para a qual a União Europeia (UE) tem estado muito ativa na definição e implementação de legislação que visa a redução das emissões e a melhoria da qualidade do ar ambiente. Portugal, assim como os outros estados membros da UE, regem-se pelas normas e leis estabelecidas pela Comissão Europeia, transpondo para o direito interno a estrutura legal comunitária.

A política de gestão do ar ambiente em Portugal assenta em dois instrumentos legais fundamentais – o D.L. 102/2010 de 23 de abril e o D. L. n.º 78/2004 de 3 de abril.

O Decreto-Lei n.º102/2010, de 23 de setembro - define as linhas de orientação da política de gestão da qualidade do ar ambiente. Este decreto transpõe para o direito interno a Diretiva n.º 2008/50/CE, relativa à qualidade do ar ambiente e a um ar mais limpo na Europa, a qual foi aprovada no âmbito da Estratégia Temática sobre Poluição Atmosférica da União Europeia. De um modo geral, este instrumento legal além de fixar os objetivos para a qualidade do ar ambiente, tendo em conta as normas, as orientações e os programas da OMS, define um regime de avaliação da qualidade do ar ambiente para o dióxido de enxofre, os óxidos de azoto, as partículas em suspensão PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>, o chumbo, o benzeno, o monóxido de carbono, bem como para o ozono e ainda Arsénio, Cádmio, Níquel, Benzo(a)pireno, como indicador de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e Mercúrio.

Os valores limite para a prevenção da saúde humana relativos às partículas em suspensão constam na Tabela 3. Os Valores Limite são os níveis fixados que não devem ser excedidos durante um ou mais períodos.

**Tabela 3: Valores limite relativos a material particulado definidos no Decreto-Lei n.º102/2010 de 23 de setembro, Anexo XV e Anexo XII respectivamente.**

| Parâmetro         | Período de Referência | Valor Limite                                                       |
|-------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------|
| PM <sub>2,5</sub> | 1 dia                 | 25 µg/m <sup>3</sup> , a não exceder no ano civil (1ª fase – 2015) |
|                   | 1 dia                 | 20 µg/m <sup>3</sup> , a não exceder no ano civil (2ª fase – 2020) |
| PM <sub>10</sub>  | 1 dia                 | 50 µg/m <sup>3</sup> , a não exceder mais de 35 × no ano civil     |
|                   | Ano civil             | 40 µg/m <sup>3</sup>                                               |

A União Europeia não definiu valor limite para as concentrações ambientais de PM<sub>2,5</sub> com base a exposição de curto prazo (média de 24 horas). No entanto a Organização Mundial da Saúde estabelece para este caso, como valor de referência para proteção da saúde pública, 25 µg/m<sup>3</sup> (WHO, 2005).

A *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 2015) impõe padrões horários, e anual para o PM<sub>2,5</sub>. O limite máximo horário definido pela Agência Americana é de 35 µg/m<sup>3</sup>, e o valor limite anual de 12 µg/m<sup>3</sup>.

Em Portugal, as entidades competentes são a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), que desenvolve actividades técnico-científicas para controlar e garantir a qualidade do ar, assegurando a exatidão dos resultados obtidos nas estações e redes de monitorização, e as Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR) que têm a responsabilidade de monitorizar a qualidade do ar na área territorial da respetiva jurisdição, bem como divulgar a ocorrência de situações de excedências relativamente aos valores limite (VL) legislados.

O segundo instrumento referido anteriormente – o D. L. n.º 78/2004 de 3 de abril - institui o regime legal de prevenção e controlo das emissões de poluentes para a atmosfera, através do estabelecimento de procedimentos e obrigações dos operadores assim como um adequado regime sancionatório, com vista reduzir a poluição atmosférica originada nas respetivas instalações a níveis aceitáveis. Este diploma promove ainda a utilização de mecanismos económicos e fiscais na área das emissões de poluentes que tornam possível a satisfação de compromissos internos e internacionais em sede de prevenção e redução da poluição atmosférica, bem como a definição da base estruturante da elaboração dos inventários de emissões nacional e regionais.

Este decreto-lei aplica-se a todas as fontes de emissão de poluentes atmosféricos associadas a actividades de carácter industrial, produção de electricidade e/ou vapor, manutenção e reparação de veículos, pesquisa e exploração de massas minerais, instalações de combustão integradas em estabelecimentos industriais, comerciais ou de serviços, entre os quais os de prestação de cuidados de saúde, os de ensino e instituições do Estado e actividades de armazenagem de combustíveis.

Compete às CCDR assegurar o cumprimento do regime de prevenção e controlo das emissões poluentes para a atmosfera, estabelecendo os procedimentos e obrigações dos operadores, com vista a evitar ou reduzir a níveis aceitáveis a poluição atmosférica originada nas respectivas instalações.

### 3.5 GESTÃO DA QUALIDADE DO AR EM AMBIENTES INDUSTRIAIS

Com o passar dos anos, a qualidade do ar tem-se tornado um aspeto ambiental de elevada relevância, principalmente na União Europeia (UE), quer pelas suas consequências nefastas na saúde pública ou pela sua influência na economia e no ambiente. A política europeia tornou-se mais restritiva nos últimos anos, através da adoção de estratégias e de uma política específica para emissões atmosféricas antropogénicas como retratado no capítulo anterior (MONTEIRO *et al.*, 2015).

As fontes industriais são uma preocupação de longa data, principalmente quando as suas atividades são realizadas nas proximidades das zonas urbanas, permitindo a exposição da população aos poluentes (DE SANTIS, 2004). A localização geográfica, as características topográficas e arquitetónicas do local onde estão instaladas, a distribuição espacial das unidades industriais, a tipologia, a fonte de energia que utilizam, as etapas de fabricação, a quantidade de poluentes emitida pelas mesmas e as condições meteorológicas, (ROJAS, 2013), faz com que a relação entre qualidade do ar e fontes de emissão em zonas industriais dificilmente seja representada por uma relação linear. De facto, são relações complexas, as quais necessitam do estudo detalhado de várias variáveis, de modo a poder avaliar-se a exposição das pessoas aos principais poluentes emitidos.

Com isso, a importância da monitorização da qualidade do ar permite a quantificação dessas concentrações na atmosfera estudada, tornando possível caracterizar e avaliar as influências das fontes e verificar a eficácia de medidas de controlo aplicadas a determinado local.

A determinação do local escolhido para monitorização depende de critérios identificados anteriormente, conforme é descrito em APA (2010): fontes de poluição do local, a topografia (interfere nas condições micro meteorológicas), uso e ocupação do solo, densidade populacional, condições meteorológicas e dados disponíveis sobre qualidade do ar do local. Os equipamentos devem ser instalados em locais que irão caracterizar a exposição da população aos poluentes.

A metodologia para análise de exposição pessoal tem ganhado grande importância nos trabalhos académicos, combinando dados de concentração com dados do *Global Positioning System* (GPS), permitindo ser avaliada a exposição no espaço e no tempo (GERHARZ *et al.*, 2009).

Outro método é a utilização de equipamentos fixos que medem a exposição de grandes populações como as estações fixas mencionadas anteriormente, porém não conseguem captar de forma precisa, a variabilidade espacial dentro de um ambiente urbano (CHANG *et al.*, 2003; KLEPEIS, 2006). No estudo de Zhu *et al.*, (2002), afirma que uma das dificuldades de quantificar as partículas é o facto de depositarem cerca de 300 m das estações de medições por dispersão, fazendo subestimar as concentrações (MORAWSKA *et al.*, 2008).

Portanto, a monitorização do material particulado pode ser realizada por diversas metodologias, dependendo do intuito do trabalho e das variáveis que têm de ser avaliadas.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

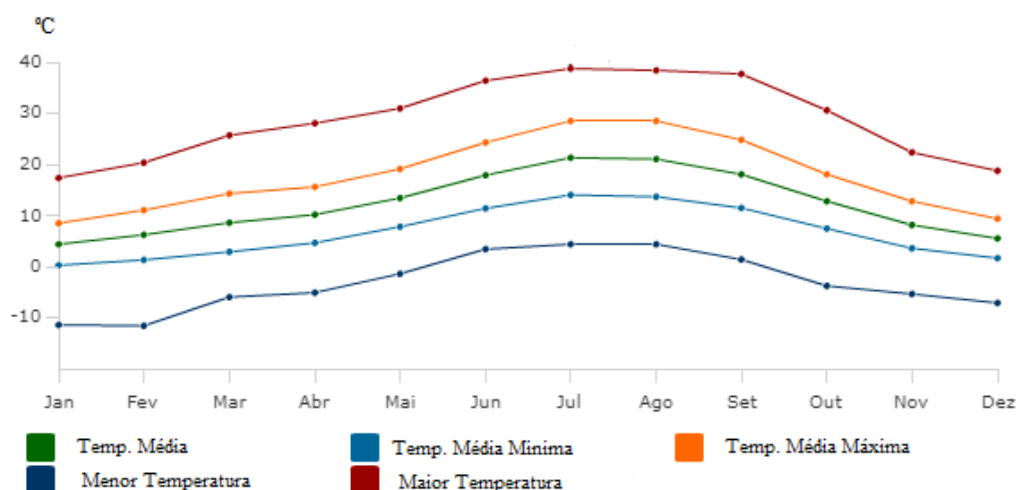
### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo foi realizado na zona industrial de Mirandela e sua envolvente. Mirandela é uma cidade transmontana, sede de concelho, pertencente ao distrito de Bragança na região do Nordeste de Portugal, situando-se na margem esquerda do rio Tua perto da Ribeira de Carvalhais, numa zona agrícola forte. Ocupa uma área de 658,96 Km<sup>2</sup> onde se distribuem 25913 habitantes, com uma densidade populacional de 34,5 habitantes por km<sup>2</sup> (INE, 2014).

Mirandela situa-se a uma altitude máxima de 938 m e mínima de 175 m e com um perímetro de 149 km<sup>2</sup> (INE, 2013).

De acordo com a classificação de Köppen & Geiger o clima é classificado em clima temperado (Csa) com invernos longos e chuvosos (média de precipitação de 119 mm) e verões curtos e secos (média de precipitação de 20 mm) com média anual de precipitação é de 760 mm (IPMA, 2016).

A figura 8 mostra as médias de temperatura para um período de 1971-2000 para a região de Mirandela. Nos meses de verão as temperaturas que podem ultrapassar os 40°C e no inverno são frequentes temperaturas mínimas negativas, inferiores a -10°C.



**Figura 8: Temperatura média para a área de estudo, no período de 1971-2000.**

Fonte: Adaptada (IPMA, 2015).

A Zona Industrial de Mirandela possui uma área de 33 hectares com 97 lotes distribuídos para os diferentes setores industriais e comerciais (ver Figura 9). Integra aproximadamente 65 empresas de diferentes tipologias: fábricas de enchidos e granitos, de materiais de construção civil, de móveis e sofás, de fermentos, leveduras e adjuvantes, de cogumelos, galvanizadoras de alumínio para a construção civil, lagares de azeite, carpintarias, serralharias e oficinas de reparação de automóveis (INE, 2017).

A ZI é circundada por plantações de oliveiras ou apenas gramíneas, e por vias de tráfego que dão acesso a cidade de Mirandela. A pavimentação da zona não se encontra em boas condições, as ruas são esburacadas e na parte central são bem visíveis os sinais de degradação, devido ao fluxo automóvel mais elevado.



**Figura 9: Localização e configuração da Zona Industrial de Mirandela.**  
Fonte: Google Earth.

## 4.2 MONITORIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO RESPIRÁVEL

### 4.2.1 Instrumentação

Para a medição em contínuo das  $PM_{2,5}$  foi utilizado um monitor ADR 1200S (*Thermo Electron*) (Figura 10). Este equipamento assenta no princípio de operação de fotometria de dispersão de luz altamente sensível. A intensidade da luz dispersada pelas partículas transportadas pelo ar que passam pela câmara de análise, linearmente proporcional à sua concentração. A configuração ótica deste sistema de medição responde de forma ótima à concentração das partículas, fornecendo medições contínuas das concentrações de partículas totais transportadas pelo ar, podendo ser equipado com um sistema de entrada que permita a medição de partículas que podem variar entre  $PM_{10}$  a  $PM_1$ . A medição de partículas  $PM_{2,5}$  foi assegurada com o acoplamento de uma cabeça de amostragem com um diâmetro de corte de  $2,5\ \mu\text{m}$ . (THERMO ELECTRON CORP., 2004).



**Figura 10: Equipamento ADR 1200S usado para quantificar a concentração mássica de  $PM_{2,5}$ .**

O monitor foi instalado na carroceria de uma carrinha (Figura 11). Em cada ponto de medição, o veículo era estacionado e em seguida procedia-se à medição de  $PM_{2,5}$  durante um período de 10 minutos.

No início de cada campanha de medição, o equipamento era calibrado relativamente ao zero e configurado para fornecer concentrações em tempo real com uma resolução temporal de 1 minuto e assegurar o armazenamento das mesmas na memória interna do sistema de medição.

Ao longo do período de avaliação, foram realizados dois circuitos distintos. Um, designado por “trajeto base”, por se iniciar no ponto 1 e terminar no ponto 9; o outro, designado por “trajeto oposto”, por envolver o trajeto na ordem inversa, i.e. começar no 9 e acabar no 1.



**Figura 11: Instalação do monitor ADR 1200S na viatura usada nas campanhas de medição.**

#### **4.2.2 Seleção e Caracterização dos pontos de Medição**

Atendendo à dimensão e às principais características físicas da área de estudo, foi definida estrategicamente uma malha de medição com nove pontos, para captar as diferentes fontes de emissões de material particulado com características distintas, cinco pontos dentro do perímetro da Zona Industrial e quatro localizados na sua envolvente próxima. A distribuição espacial dos diferentes pontos de medição está representada na Figura 12.




**Figura 12: Localização dos pontos na área de estudo e suas envolventes.**

Fonte: Google Earth.

As principais características dos pontos de medição constam da Tabela 4, juntamente com a indicação da média horária da contagem de veículos em cada ponto durante todas as campanhas nos momentos das medições.





**Tabela 4: Principais características dos locais de medição na zona industrial de Mirandela.**

| Pontos localizados dentro da Zona Industrial |                                                       |                                                                                     |                                                     |                             |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------|
| Ponto                                        | Características físicas dos pontos                    | Imagem dos pontos                                                                   | Fontes de emissão observada nos pontos              | Número de veículos por hora |
| Ponto 1                                      | - Zona Central<br>-Urbanizado<br>- Tráfego rodoviário |  | -Emissão tráfego rodoviário<br>- Emissão de chaminé | 100 veículos                |

**Tabela 4 (cont.): Principais características dos locais de medição na zona industrial de Mirandela.**

|                                                                                                                                                                                     |                                                                                     |                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Ponto 2</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zona Central</li> <li>-Urbanizado</li> <li>- Tráfego rodoviário</li> <li>- Pavimento em más condições</li> </ul>            |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Emissão tráfego rodoviário</li> <li>- Suspensão de poeira do solo</li> </ul> <p>50 veículos</p> |
| <p>Ponto 3</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Presença de espaços verdes</li> <li>-Afastado da zona central</li> </ul>                                                     |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Suspensão de poeira do solo</li> </ul> <p>5 veículos</p>                                       |
| <p>Ponto 4</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Presença de espaços verdes</li> <li>- Plantação de oliveiras nas proximidades</li> <li>-Afastado da zona central</li> </ul> |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Suspensão de poeira por indústria cimenteira</li> </ul> <p>2 veículos</p>                      |
| <p>Ponto 5</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ponto mais distante da Zona central</li> <li>- Próximo a residências</li> </ul>                                             |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Suspensão de poeira por empresa mecânica</li> </ul> <p>1 veículos</p>                          |

**Tabela 4 (cont.): Principais características dos locais de medição na zona industrial de Mirandela.**

| <b>Pontos localizados nas envolventes da Zona Industrial</b> |                                                                                                                                                                      |                                                                                     |                                                                                                            |                                    |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| <b>Ponto</b>                                                 | <b>Características físicas</b>                                                                                                                                       | <b>Imagem do local</b>                                                              | <b>Fontes de emissão</b>                                                                                   | <b>Número de veículos por hora</b> |
| Ponto 6                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Propriedade privada rural</li> <li>-Área verde em redor</li> </ul>                                                          |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Suspensão de solo da agricultura</li> </ul>                       | 1 veículos                         |
| Ponto 7                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Propriedade privada rural</li> <li>-Área verde em redor</li> <li>-Rodovia nas proximidades</li> </ul>                       |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Emissão por parte da atividade de agricultura</li> </ul>          | 15 veículos                        |
| Ponto 8                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Em frente a distribuidora de botijas de gás</li> <li>- Plantação de oliveiras</li> <li>- Área verde com pecuária</li> </ul> |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Suspensão de poeira, pavimento em más condições</li> </ul>        | 85 veículos                        |
| Ponto 9                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Proximidades de uma olivicultura</li> <li>- Próximo da marginal da rodovia</li> </ul>                                       |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Emissão tráfego rodoviário</li> <li>-Suspensão do solo</li> </ul> | 40 veículos                        |

#### **4.2.3 Campanhas de medição**

As campanhas de monitorização foram realizadas no período de 20 de abril a 01 de junho de 2018, em períodos diurnos entre as 08h e às 14h, em períodos vespertinos entre as 16h e às 19h e períodos noturnos entre as 21h e às 23h. Foram realizadas no total 11

campanhas, sendo 5 em períodos diurnos, 4 em períodos vespertinos e 2 em períodos noturnos, em diferentes dias da semana, como se apresenta na Tabela 5.

**Tabela 5: Períodos (datas e horas) das campanhas de medição realizadas na Zona Industrial e sua envolvente.**

| <b>Dia</b> | <b>Período</b> | <b>Início</b> | <b>Término</b> | <b>Trajeto*</b> |
|------------|----------------|---------------|----------------|-----------------|
| 20/04/2018 | Diurno         | 10h52'        | 13h47'         | base            |
| 27/04/2018 | Diurno         | 08h32'        | 10h39'         | base            |
| 27/04/2018 | Diurno         | 10h41'        | 12h58'         | oposto          |
| 03/05/2018 | Diurno         | 10h05'        | 12h21'         | base            |
| 11/05/2018 | Vespertino     | 16h53'        | 19h02'         | oposto          |
| 15/05/2018 | Noturno        | 21h07'        | 23h27'         | base            |
| 18/05/2018 | Vespertino     | 15h11'        | 17h15'         | oposto          |
| 23/05/2018 | Noturno        | 20h54'        | 22h58'         | oposto          |
| 25/05/2018 | Vespertino     | 10h08'        | 12h16'         | base            |
| 29/05/2018 | Vespertino     | 14h00'        | 15h56'         | base            |
| 01/06/2018 | Vespertino     | 13h54'        | 15h57'         | base            |

\* Trajeto base - início da amostragem no Ponto 1 e término no Ponto 9.  
Trajeto oposto- início da amostragem no Ponto 9 e término no Ponto 1.

#### 4.3 RECOLHA DE DADOS COMPLEMENTARES

Além das medições de material particulado, procedeu-se ainda à recolha de informação relevante relacionada com a qualidade do ar, em particular informação relativa às principais fontes de poluição atmosférica, fixas e móveis, identificadas na área de estudo e informação meteorológica.

Em relação às fontes de poluição do ar, recorreu-se a uma análise visual com identificação dos principais pontos de emissão e à contagem do tráfego automóvel nos diferentes pontos de medição e nas diferentes campanhas realizadas. Teria sido interessante realizar um inventário mais detalhado, mas devido à complexidade da tarefa e à exiguidade de tempo não foi de todo possível considerar essa ação.

Relativamente às variáveis meteorológicas, pela grande influência que exercem na emissão, dispersão e acumulação de poluentes, principalmente para o material particulado

(TIRABASSI & MORAES, 2008), os dados de temperatura, humidade relativa, velocidade e direcção do vento e precipitação, foram recolhidos por uma estação meteorológica instalada nas proximidades do local de estudo, para auxiliar na análise das concentrações de material particulado.

#### 4.4 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

A análise dos dados recolhidos neste trabalho envolveu um processamento estatístico simples com o objetivo de caracterizar a dinâmica dos níveis de partículas  $PM_{2,5}$  na área de estudo, durante o período de avaliação. Numa primeira fase, calcularam-se vários parâmetros simples de estatística descritiva, como máximos, mínimos, médias, medianas e desvios padrão.

Numa segunda fase procedeu-se à análise temporal e espacial dos níveis de  $PM_{2,5}$ , utilizando-se o Microsoft Excel juntamente com a ferramenta, software R versão 3.4.5. Ainda com o auxílio desta última ferramenta informática, procedeu-se a uma análise direccional da informação para determinar a origem das concentrações de  $PM_{2,5}$ . Este processamento consiste em associar à direcção dos ventos registada e o valor médio do poluente. No final, obtém-se um gráfico semelhante ao da rosa-dos-ventos, chamado de Rosa de Poluição para verificação de existentes contribuições de fontes não pontuais (ARAÚJO, 2008).

Numa terceira etapa, de modo a identificar relações entre as condições ambientais e os níveis de  $PM_{2,5}$  construiu-se uma matriz de correlação de Pearson.

A matriz de correlação de Pearson apresenta coeficientes de relações entre as partículas ( $PM_{2,5}$ ), as variáveis meteorológicas e a intensidade de tráfego automóvel para a globalidade das observações efetuadas no período de avaliação.

A interpretação da matriz pode ser realizada de três maneiras distintas: a direcção da figura indica correlação positiva, negativa ou zero (elipses orientadas à direita significam correlação positiva, orientadas à esquerda indicam correlação negativa), quanto mais próxima da forma de círculo, significa correlação zero. A cor indica significância estatística da correlação e o valor numérico é descrito em percentagem, representando o coeficiente de correlação de Pearson (DAVID & KARL, 2012). A análise desse coeficiente é dada, quando considerada positiva o coeficiente é  $r > 0$ , nesse caso a relação é linear crescente, a variável em estudo aumenta ao mesmo tempo que variável em análise. A correlação negativa, quando  $r$

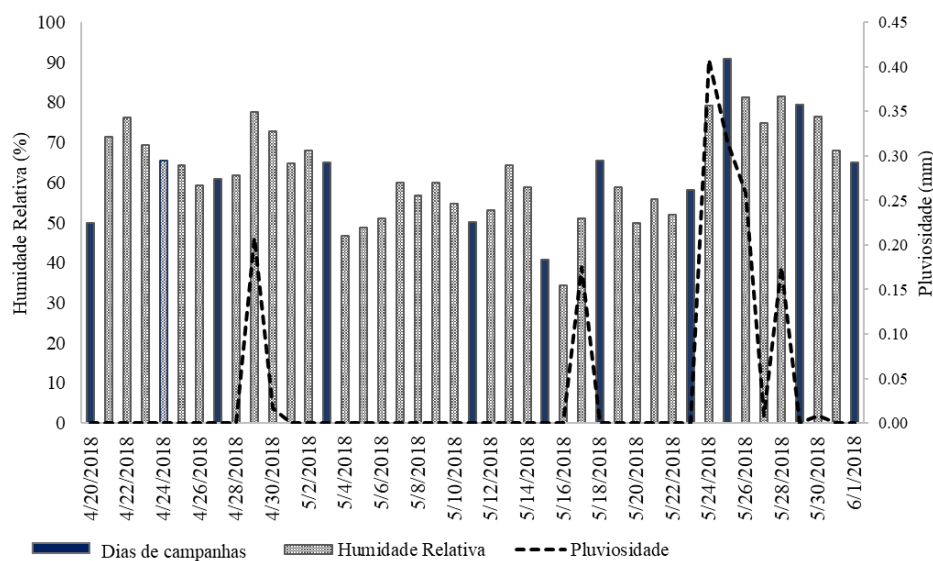
$< 0$  nesse caso a relação é inversamente proporcional. No extremo, se  $r = 100\%$  ou  $r = -100\%$  os pontos se encontram em linha reta, e se  $r = 0$  não existe associação linear (FILHO, 2009).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

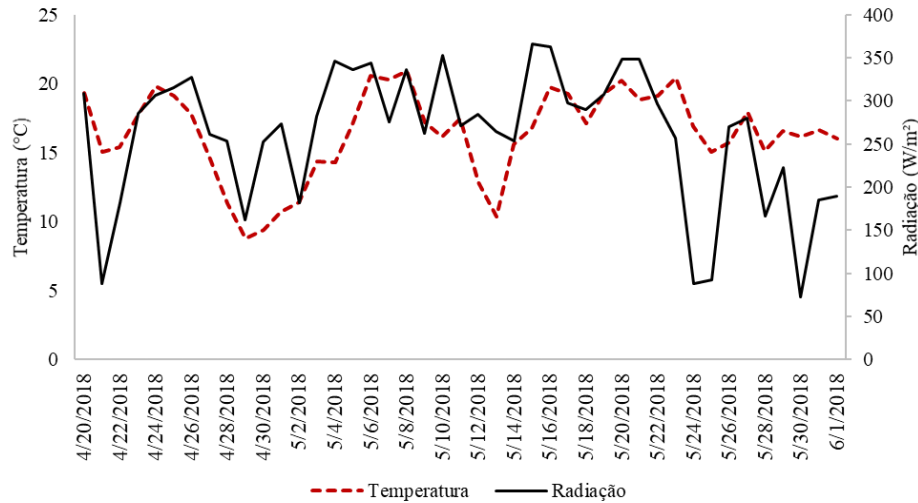
### 5.1 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS

As condições meteorológicas foram analisadas para a área de estudo durante o período global das campanhas de 20/04/2018 a 01/06/2018 e para os dias exatos das medições descritos anteriormente na seção 4.2.3.

A humidade relativa, pluviosidade, radiação e temperatura apresentaram variações entre campanhas de 34 a 90%, 0 a 0,31 mm, 72 a 353 W/m<sup>2</sup> e 8 a 21°C, respetivamente. As Figuras 13 e 14 representam as médias diárias das variáveis citadas anteriormente para todo o período.

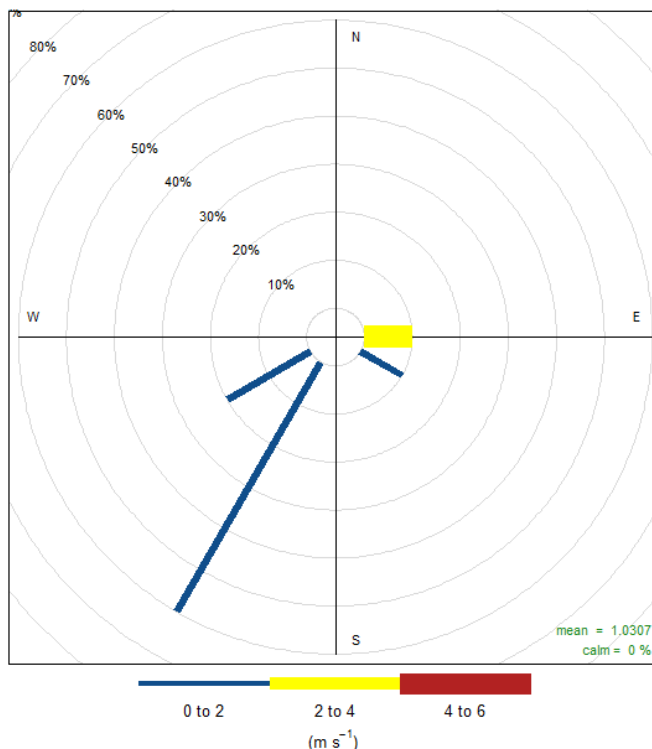


**Figura 13: Média diária de humidade relativa e pluviosidade para o período global de avaliação.**



**Figura 14: Média diária de temperatura e radiação para o período global de avaliação.**

A rosa dos ventos na Figura 15 representa a velocidade e direção do vento para todo o período, sendo um parâmetro importante na análise da dispersão dos poluentes ou verificação de fontes pontuais e não pontuais, para posterior análise e compreensão do comportamento da concentração do material particulado (CARVALHO, *et al.*, 2013). A velocidade do vento apresentou variação de 2,3 m/s a 0,3 m/s e uma média de 1,12 m/s. As direções prevaletentes do vento na área de estudo foram noroestes e sudoestes, as velocidades com maior intensidade são em leste. A primeira campanha realizada apresentou a média de maior amplitude para velocidade do vento, caracterizada por não ser um dia de calmaria, onde  $v > 1\text{m/s}$ . A campanha do dia 25/05/2018 apresentou menor média de velocidade (0,31 m/s) e, como consequência menor propensão de dispersão de poluentes atmosféricos (CARVALHO, *et al.*, 2013).



**Figura 15: Rosa dos Ventos para o período global de avaliação.**

As condições meteorológicas durante os períodos das campanhas de monitorização são apresentadas na Tabela 6.

De modo geral, as campanhas foram realizadas ao longo de um período temporal com temperaturas moderadas e relativamente seco. Entretanto, os dias 18/05, 23/05, 25/05 e 29/05 apresentaram condições de maior humidade relativa por serem dias posteriores a dias com precipitação. A única campanha que apresentou precipitação ao mesmo tempo das amostragens foi (25/05/2018). As temperaturas máximas, mínimas, média, humidade relativa e radiação foram respectivamente para os dias de amostragem em 20,44 °C, 14,38 °C e 16,59 °C, 62,41% e 254,74 W/m<sup>2</sup>.

**Tabela 6: Parâmetros estatísticos relativos a variáveis meteorológicas para cada campanha.**

| Campanha   | Período | Precipitação acumulada (mm) | Média diária velocidade do vento (m/s) | Temp. Média (°C) | Média diária da radiação (W/m <sup>2</sup> ) | Média diária da humidade relativa (%) |
|------------|---------|-----------------------------|----------------------------------------|------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------|
| 20/04/2018 | Diurno  | 0                           | 2,29                                   | 19,29            | 309,08                                       | 49,81                                 |

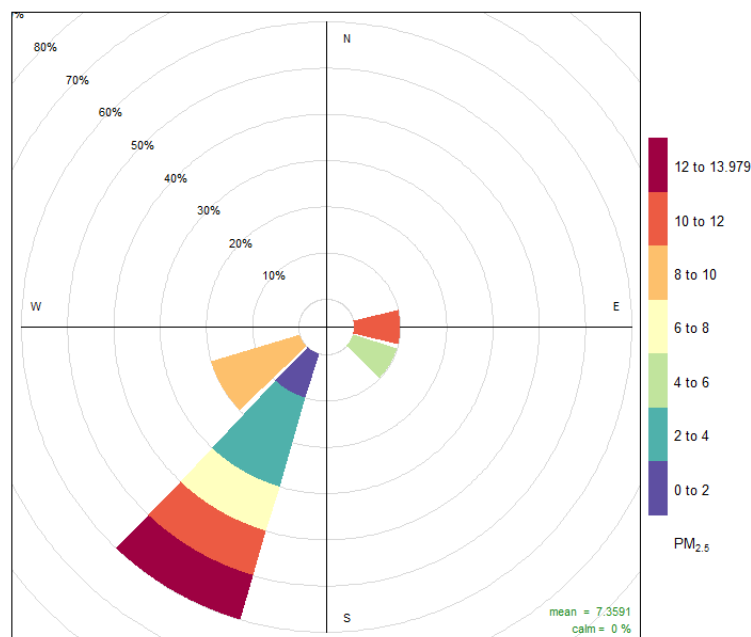
| Campanha   | Período    | Precipitação acumulada (mm) | Média diária velocidade do vento (m/s) | Temp. Média (°C) | Média diária da radiação (W/m <sup>2</sup> ) | Média diária da humidade relativa (%) |
|------------|------------|-----------------------------|----------------------------------------|------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------|
| 27/04/2018 | Diurno     | 0                           | 0,97                                   | 14,71            | 261,53                                       | 60,90                                 |
| 27/04/2018 | Diurno     | 0                           | 0,97                                   | 14,71            | 261,53                                       | 60,90                                 |
| 03/05/2018 | Diurno     | 0                           | 0,98                                   | 14,38            | 282,10                                       | 65,12                                 |
| 11/05/2018 | Vespertino | 0                           | 1,22                                   | 17,44            | 271,65                                       | 50,22                                 |
| 15/05/2018 | Noturno    | 0                           | 1,11                                   | 16,78            | 366,28                                       | 40,70                                 |
| 18/05/2018 | Vespertino | 0                           | 1,38                                   | 17,13            | 289,43                                       | 65,36                                 |
| 23/05/2018 | Noturno    | 0                           | 0,71                                   | 20,44            | 256,33                                       | 58,13                                 |
| 25/05/2018 | Vespertino | 0,31                        | 0,32                                   | 15,02            | 92,33                                        | 90,98                                 |
| 29/05/2018 | Vespertino | 0                           | 0,67                                   | 16,60            | 222,81                                       | 79,42                                 |
| 01/06/2018 | Vespertino | 0                           | 0,66                                   | 16,04            | 189,09                                       | 65,01                                 |

## 5.2 MATERIAL PARTICULADO PM<sub>2,5</sub> NA ÁREA DE ESTUDO

### 5.2.1 Concentrações de PM<sub>2,5</sub> no Período de Avaliação

Os níveis de PM<sub>2,5</sub> para toda a Zona Industrial e sua envolvente, ou seja, para todas as campanhas realizadas, apresentaram média de 8 µg/m<sup>3</sup>. Os valores limite legais de Portugal foram baseados nos VL da União Europeia, valores diários de PM<sub>2,5</sub> que não podem ser ultrapassados em 25 µg/m<sup>3</sup> em um ano civil. A World Health Organization (WHO) sugere um valor diário de exposição também de 25 µg/m<sup>3</sup>. Embora a concentração média obtida para a zona industrial e peri-industrial não atinja os limiares de proteção da saúde humana, em alguns dos pontos registou-se uma aproximação desses limiares. Acresce ainda que é expectável que ao longo do ano civil existam períodos mais favoráveis às emissões e menos favoráveis à dispersão de poluentes, podendo contribuir certamente para o aumento dos níveis médios anuais de poluição. O estudo de Shataloff (2013), realizado para determinar a concentração de PM<sub>2,5</sub> em ZI da região de Setubal em Portugal, a partir de dados da rede de monitorização Qualar, obteve médias anuais de 34,2 µg/m<sup>3</sup> na estação Quebedo e 14,7 µg/m<sup>3</sup> na subestação de St<sup>o</sup> Ovidio, respectivamente a maior e menor concentração para a região.

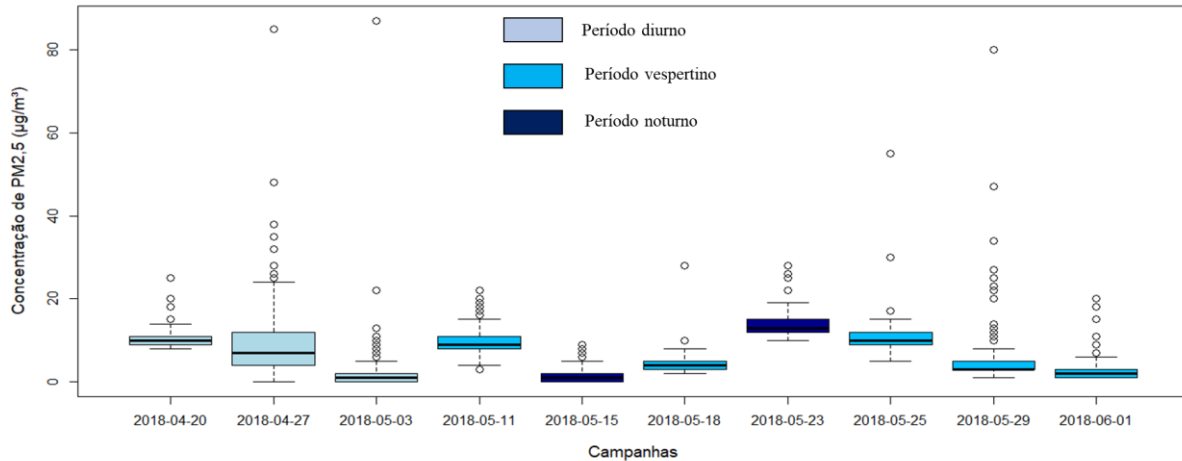
Para verificação da existência de influência de fontes localizadas fora da zona industrial, construiu-se uma rosa de poluição (Figura 16). Verifica-se que as concentrações mais elevadas foram registadas na presença de ventos de sudoeste, que são ventos que atravessam a cidade de Mirandela.



**Figura 16: Rosa de poluição para a média global das campanhas realizadas.**

Na Figura 17 encontra-se representada, na forma de *boxplot*, as variações das concentrações de  $PM_{2,5}$  registadas ao longo dos períodos de monitorização das campanhas realizadas. O *boxplot* é um tipo de representação que mostra os valores médios, os quartis superior e inferior e o intervalo dos dados obtidos. O limite inferior de cada *boxplot* indica o percentil 25 e o limite superior indica o percentil 75. A mediana (indicada pelo percentil 50) é representada pela linha horizontal dentro do “*box*”. O comprimento de cada “*box*” representa a gama de intervalos entre quartis. As barras de erro acima e abaixo representam normalmente os percentis 90 e 10, respectivamente. Os valores extremos representados pelos círculos fechados são os valores que se situam acima do percentil 75. A vantagem desta representação gráfica em relação às médias simples é permitir uma observação geral do conjunto de dados e não apenas de um valor que represente o todo (MOROCO, 2003).

A média para as campanhas de monitorização variaram entre os  $1,75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , registados no dia 15 de maio, e  $13,97 \mu\text{g}/\text{m}^3$  observados no dia 23 de maio.



**Figura 17: Distribuição interquartil e extremos das concentrações de PM<sub>2,5</sub> para cada campanha.**

No dia 15 de maio foi registada a menor média, a campanha foi realizada no período noturno, durante o qual as indústrias e empresas se encontravam fechadas e o tráfego automóvel local apresentava menor intensidade. Na campanha do dia 23 de maio, também realizada em período noturno, foram registadas concentrações mais elevadas de PM<sub>2,5</sub>, com um valor médio de 13,97 µg/m<sup>3</sup>. A diferença encontrada pode ser total ou parcialmente explicada pelas distintas condições de vento que caracterizaram os dois dias. No dia 15/05 o vento soprou com mais intensidade enquanto no dia 23/05 prevaleceram condições de calma (velocidades de vento inferiores a 1 m/s), que favorecem a acumulação de poluentes na atmosfera. De facto, a velocidade do vento é um fator importante na dispersão dos poluentes atmosféricos, sendo que em situações de calma a dispersão dos poluentes é dificultada e as concentrações atmosféricas tendem a aumentar em função das emissões (CARVALHO *et al.*, 2013).

A campanha do dia 25/05/2018, feriado em Mirandela, foi realizada no período vespertino e num período em que ocorreu alguma precipitação. A média registada nesse período foi de 10,69 µg/m<sup>3</sup>, indiciando o efeito das condições favoráveis à redução das partículas como o facto da ZI se encontrar sem atividade e as medições terem sido realizadas em períodos de precipitação leve. Guo *et al.*, (2014) afirmou, com base nos seus resultados, que a precipitação num curto período e dentro de meia hora de seu início, a concentração de PM<sub>2,5</sub> diminuía drasticamente por deposição húmida. Todavia, não foi constatado essa diminuição na campanha desse dia, dado que os valores extremos coincidiram com o período

do início de chuva. Uma explicação para o sucedido pode dever-se ao facto de o monitor ADR 1200S não possuir um sistema de secagem do ar amostrado, podendo as gotículas de chuva interferirem com a leitura do equipamento, resultando numa sobreestimação dos resultados (JAYARATNE, 2018).

### 5.2.2 Padrão Espacial dos Níveis de PM<sub>2,5</sub>

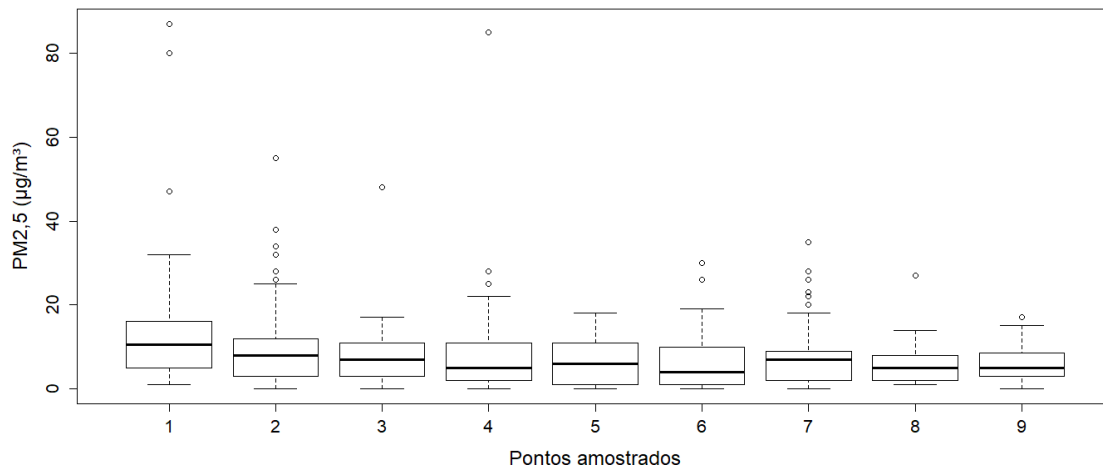
A Tabela 7 apresenta parâmetros estatísticos relativos às concentrações de PM<sub>2,5</sub> obtidas a partir de observações registadas em cada ponto de amostragem (9), englobando os dados das 11 campanhas realizadas para os períodos diurno, diurno vespertino e noturno. Para uma melhor visualização os registos de PM<sub>2,5</sub> são também apresentados na Figura 18, onde se mostra na forma de *boxplot* a variação interquartil e os valores extremos obtidos para cada ponto de medição.

As médias de PM<sub>2,5</sub> variam nos pontos entre os 12,63 µg/m<sup>3</sup>, registadas no ponto 1, e 5,82 µg/m<sup>3</sup>, registado no ponto 9. Os valores máximos também são identificados para estes mesmos pontos com uma variação de 87 µg/m<sup>3</sup>, observados no ponto 1, e 17 µg/m<sup>3</sup>, no ponto 9.

**Tabela 7: Parâmetros estatísticos relativos às concentrações de PM<sub>2,5</sub> (µg/m<sup>3</sup>) para cada ponto de amostragem e para cada uma das campanhas realizadas.**

| Pontos | Média (µg/m <sup>3</sup> ) | Mediana (µg/m <sup>3</sup> ) | Mínimo (µg/m <sup>3</sup> ) | Máximo (µg/m <sup>3</sup> ) | Desvio padrão | Variância |
|--------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|-----------|
| 1      | 12,63                      | 10,50                        | 1,00                        | 87,00                       | 12,34         | 152,41    |
| 2      | 9,34                       | 8,00                         | 0,00                        | 55,00                       | 8,91          | 79,48     |
| 3      | 7,16                       | 7,00                         | 0,00                        | 48,00                       | 6,03          | 36,39     |
| 4      | 7,60                       | 5,00                         | 0,00                        | 85,00                       | 9,29          | 86,32     |
| 5      | 6,65                       | 6,00                         | 0,00                        | 18,00                       | 5,56          | 30,96     |
| 6      | 6,09                       | 4,00                         | 0,00                        | 30,00                       | 5,72          | 32,72     |
| 7      | 6,89                       | 7,00                         | 0,00                        | 35,00                       | 6,23          | 38,89     |
| 8      | 5,88                       | 5,00                         | 1,00                        | 27,00                       | 4,04          | 16,33     |
| 9      | 5,82                       | 5,00                         | 0,00                        | 17,00                       | 3,89          | 15,18     |

Todavia, as concentrações máximas excederam em 78% dos pontos os valores limite legais.



**Figura 18: Média das concentrações de PM<sub>2,5</sub> para cada ponto em todas as campanhas realizadas.**

De um modo geral, à semelhança do que se já tinha referido anteriormente, o valor médio e a mediana das concentrações nos diferentes pontos não ultrapassaram o valor limite anual imposto pela legislação da UE ( $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e nacional.

As concentrações médias mais elevadas do poluente foram registadas no ponto 1 e no ponto 2. Pontos que se caracterizam por apresentar uma intensidade de tráfego rodoviário superior à registada nos outros pontos de medição. O ponto 1 e o ponto 2 localizam-se no eixo rodoviário principal da área industrial. As emissões do escape dos automóveis a diesel contribuem substancialmente para o aumento do nível da fração fina de material particulado (PANT *et al.*, 2015), dado que uma grande parte dos automóveis que circulam pela zona ainda não estão equipados com tecnologia de remoção de partículas (e.g. filtros). Segundo a Associação Automóvel de Portugal (ACAP) (2015), a média de idade dos automóveis portugueses que circulam as estradas são maiores que a média de outros países da UE, contribuindo para a emissão de partículas, através da queima de combustível, pelo desgaste das peças e ausência de tecnologia de controlo.

A ausência de área verde em seu entorno contribui para acumulação de PM ao redor da zona e sua dispersão para as envolventes. Estudos (NOWAK, 1994; YANG *et al.*, 2005; MCDONALD *et al.*, 2007) já demonstraram o poder de remediação das plantas para a qualidade do ar. Em Xangai na China, realizada uma comparação de área com ausência de floresta e área com florestas localizadas de 50 a 100 metros da zona urbana de avaliação apresentaram uma diminuição nas concentrações de PM em 9,1%, (SAEBO *et al.*, 2012)

Importa também acrescentar que as medições no ponto 1 podem ter sido influenciadas pela presença de uma fonte fixa (chaminé de uma indústria alimentar) em operação durante as campanhas diurnas. A opacidade do efluente gasoso dessa fonte era bem visível à vista desarmada.

Os pontos 3, 4 e 5 ainda localizados dentro da Zona Industrial apresentaram concentrações menores que os pontos anteriores. No ponto 3, localizado numa área afastada do centro da Zona Industrial, afastada das vias rodoviárias principais, com empresas comerciais ao seu redor (lojas de vestuário, artigos, etc.) e área com gramíneas na proximidade, apresentou sistematicamente valores mais baixos, sendo o valor médio de 7,16  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

As concentrações no ponto 4, localizado nas proximidades de uma indústria de betão, refletem a influência das emissões da atividade da indústria, que promovem a suspensão de partículas finas, com alteração da visibilidade do local.

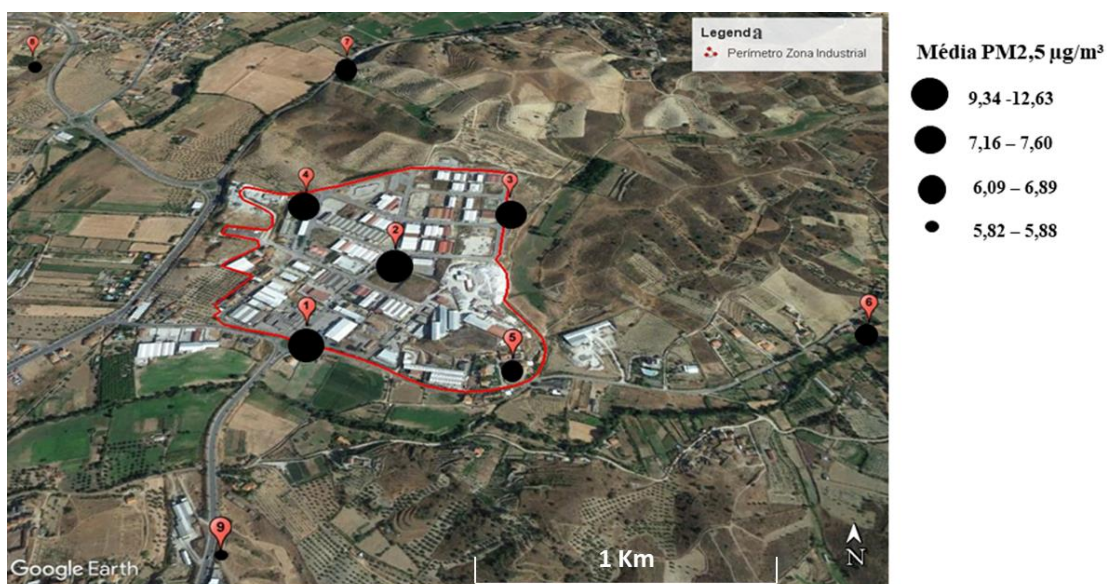
O ponto 5 possui uma localização ainda mais afastada da parte central do que os pontos 3 e 4 e a oficina mecânica instalada não demonstrou influência significativa em relação as concentrações do  $\text{PM}_{2,5}$  nos momentos em que estavam sendo realizadas as medições. Estes locais são caracterizados por apresentar boas condições de ventilação, devido à proximidade a espaços abertos, áreas verdes sem edificado.

Relativamente aos pontos localizados na envolvente da ZI, com a exceção do ponto 7, todos os outros caracterizaram-se por apresentar uma baixa oscilação de valores de concentração de  $\text{PM}_{2,5}$ , variando entre mínimos próximos de 0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e máximos inferiores a 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

No ponto 7, os níveis de  $\text{PM}_{2,5}$  exibiram uma variação mais acentuada, com valores extremos acima de 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a serem registados com alguma frequência. Este facto deve-se ao desenvolvimento de atividades agrícolas realizadas com trator, durante as medições. A proximidade às vias de tráfego pode também ter influenciado as concentrações desse local (KRECL *et al.*, 2018). As médias das concentrações registadas nos pontos 8 e 9 foram semelhantes, por serem locais mais expostos aos ventos, o que oferece melhores condições de dispersão, mesmo estando próximos a vias de tráfego rodoviário.

Para uma melhor compreensão e visualização do padrão espacial dos níveis de  $\text{PM}_{2,5}$  a Figura 19 mostra a distribuição das médias das partículas para todos os pontos amostrados

obtidos nas campanhas realizadas. Observa-se que com o afastamento face ao perímetro da ZI as concentrações passaram a diminuir proporcionalmente, pois as concentrações tendem a atenuar-se com o aumento da distância entre fonte de emissão e o receptor (KRECL *et al.*, 2016; EKEBERGH, 2014).

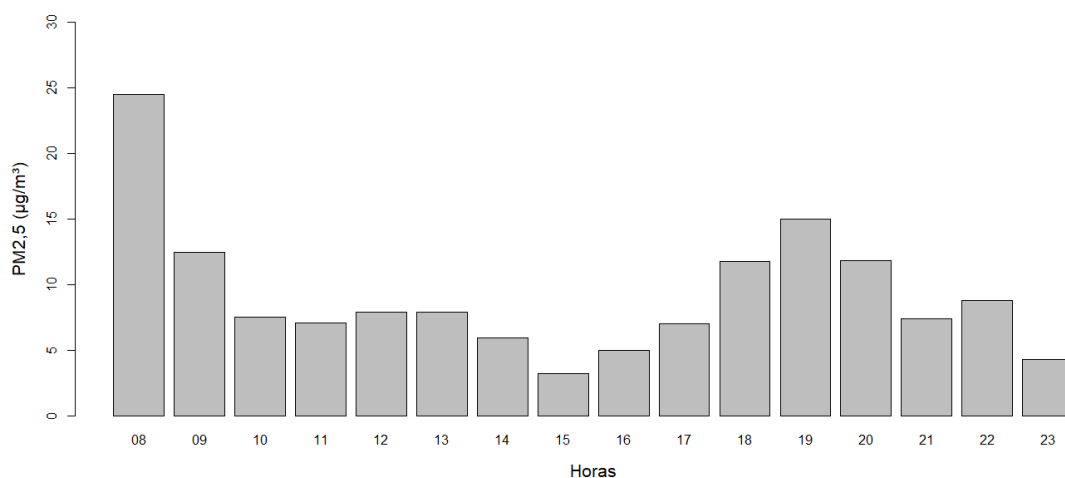


**Figura 19: Distribuição espacial das concentrações médias de PM<sub>2,5</sub> na Zona Industrial de Mirandela.**

Fonte: Google Earth.

### 5.2.3 Ciclo Diário dos Níveis de PM<sub>2,5</sub>

Como já foi referido, as medições foram realizadas em diferentes períodos (diurno, vespertino e noturno) para analisar a concentração de PM<sub>2,5</sub> em diferentes momentos de atividade da Zona Industrial, fluxo de veículos e condições meteorológicas. Neste sentido, embora tenham sido medições realizadas em dias diferentes, com diferentes condições meteorológicas, procurou-se num simples exercício académico, obter a evolução aproximada das concentrações de PM<sub>2,5</sub>, ao longo de uma parte considerável do ciclo diário de funcionamento da ZI (ver Figura 20).



**Figura 20: Níveis diário de PM<sub>2,5</sub> para Zona Industrial.**

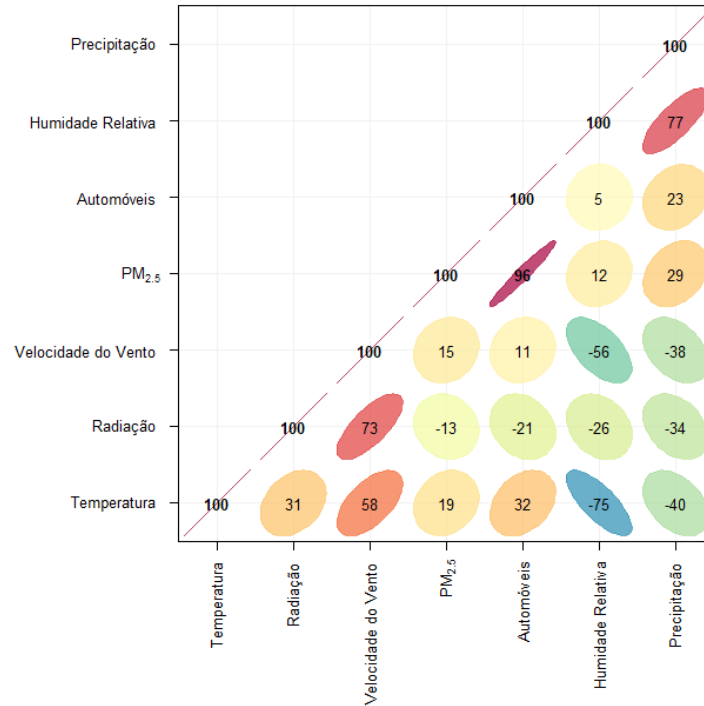
Ainda que esta análise encerre algumas (muitas) incertezas, constata-se que o perfil temporal tende a descrever o comportamento de uma das principais fontes já identificadas anteriormente – o tráfego rodoviário. De facto, as concentrações mais elevadas registadas no período da manhã e no final da tarde coincidem com a abertura e o encerramento das atividades (ou a maior parte delas) que se desenvolvem na zona industrial. Estes períodos estão associados a um maior fluxo de veículos ligeiros e pesados naquela área de estudo.

Às 08h da manhã, período diurno teve registos de fluxo automóvel médio de 100 veículos por hora, horário de entrada de trabalhadores, saída de caminhões e o único horário observado de movimentação em algumas empresas, observada nas horas iniciais (08h-09h).

No período vespertino o pico de concentração seria às 19h, caracterizado também pelo aumento de fluxo de automóveis e camiões, por ser o horário de saída (maioria dos trabalhadores).

### 5.3 RELAÇÃO DE PM<sub>2,5</sub> E CONDIÇÕES AMBIENTAIS

A matriz de correlação (Figura 21), criada para todos os pontos amostrados e como variável dependente o PM<sub>2,5</sub>. O objetivo da análise foi observar uma relação das concentrações de PM<sub>2,5</sub> com o número de veículos e com as variáveis meteorológicas selecionadas - temperatura, humidade, radiação, velocidade do vento e precipitação.



**Figura 21: Matriz de correlação de Pearson para PM<sub>2,5</sub> e variáveis ambientais.**

A matriz em geral apresentou correlações para a concentração das partículas em fraco grau negativo com a radiação ( $r = -13\%$ ), uma correlação moderada positiva com a precipitação e humidade relativa ( $r = 12\%$  e  $r = 29\%$ ). O efeito destas variáveis no material particulado depende de fatores como a intensidade da precipitação, tamanho da gota de chuva e tamanho da partícula (CAO *et al.*, 2009). De acordo com Feng & Wang (2012), as partículas grosseiras podem ser lavadas do ar de forma mais eficiente do que as partículas finas.

A velocidade do vento e temperatura tiveram fraca correlação positiva ( $r = 15\%$  e  $r = 19\%$ ), o vento tanto pode ser considerado dispersante como também transportador de partículas de um local para outro (KRECL *et al.*, 2016).

A maior correlação encontrada foi com a variável automóveis, para a qual se obteve uma forte correlação positiva ( $r = 98\%$ ), confirmando o facto já referido anteriormente, sobre a influência do tráfego rodoviário nos níveis de partículas finas.

#### 5.4 ESTRATÉGIAS DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE MATERIAL PARTICULADO

Apesar dos níveis das partículas finas encontradas na Zona Industrial de Mirandela não terem ultrapassado os valores limite estabelecidos na legislação da UE e nacional e valores recomendados pela WHO, as ações de mitigação são importantes para que as indústrias e a sociedade se consciencializem a emitirem cada vez menos poluentes para a atmosfera no intuito de assegurar uma qualidade de vida melhor para as gerações futuras e para se aproximarem do conceito Eco- Parques Industriais.

O sector industrial é aquele que tem maior dificuldade de aplicar medidas, porque a competitividade industrial impede que muitas dessas medidas sejam adotadas, fazendo assim com que esse sector pague menos por toda a poluição gerada. É necessário que seja garantido um controlo e acompanhamento por parte do governo em todas as Zonas Industriais garantindo que estejam cumprindo as normas vigentes (ZHU *et al.*, 2012).

Num estudo desenvolvido por Zhu *et al.*, (2012), os autores propõem medidas como a substituição de combustíveis fósseis por fontes alternativas e limpas realizando a promoção e investimentos em energias renováveis. A fiscalização das normas faz com que ocorra melhoria, controlo e prevenção da poluição em parques industriais. Juntamente com essas ações a monitoração por redes automáticas de qualidade do ar promovem um acompanhamento da real situação dos parques industriais e a identificação dos poluentes que estão presentes no local.

Como pode ser visualizado nesse trabalho, as emissões rodoviárias são fontes que contribuem de forma representativa. O sector dos transportes é uma importante fonte de poluentes do ar. Apesar das políticas e dos avanços tecnológicos, os transportes em termos globais são responsáveis por 10% das partículas finas presentes na atmosfera (IEA, 2016).

A área de estudo mostrou uma elevada quantidade de automóveis circulando dentro da Zona, muito deles dos próprios trabalhadores. Ou seja, o incentivo ao uso de bicicletas e construção de ciclovias, poderia constituir um tipo de ação de mitigação, com resultados positivos na qualidade do ar. A obrigação da inspeção periódica dos veículos, a utilização de biocombustíveis, a substituição e modernização da frota, incentivo ao uso de carros elétricos, melhorias na pavimentação para evitar suspensão de partículas e implantação de barreiras verdes ao redor da ZI, com a importância citada anteriormente na redução das partículas suspensas no local.

O objetivo dessas medidas referidas é reduzir e controlar a poluição em áreas industriais, pois a sua redução trará benefícios, sobretudo, para a saúde humana e para os ecossistemas. Para as indústrias, além de cumprirem a legislação, essas ações podem ser o primeiro passo para a busca da transformação de Parques Industriais em Eco- Parques Industriais, benefícios não só para a população nas envolventes, mas também benefícios no metabolismo industrial daquela zona.

Contudo é importante salientar que por vezes as medidas não são compreendidas pela sociedade civil e, portanto, é necessário investir na informação da necessidade das medidas adotadas.

## 6. CONCLUSÃO

Nesta dissertação apresenta-se um estudo piloto realizado na Zona Industrial de Mirandela com o objetivo de informar as autoridades e as populações locais relativamente à qualidade do ar. O trabalho apresenta uma visão geral da magnitude, assim como da distribuição temporal e espacial de  $PM_{2,5}$  em diferentes pontos localizados dentro e fora do perímetro da zona industrial. As medições realizadas na primavera mostraram concentrações significativamente altas, quando comparadas com outras Zonas Industriais de dimensões mais elevadas, para a mesma época do ano.

A análise dos níveis de  $PM_{2,5}$  permitiu dar início à compreensão da dinâmica e verificar as fontes emissoras que mais contribuem para o aumento desse poluente, num período de avaliação curso, mas suficientemente representativo das condições primaveris.

Os níveis obtidos pelo estudo não ultrapassaram os valores estabelecidos na legislação nacional e nas recomendações da WHO ( $25 \mu g/m^3$ ). Entretanto, foi possível observar uma variabilidade temporal e espacial da concentração desse poluente ao longo do período de análise. Em alguns momentos pontuais das amostragens os níveis ultrapassavam 200% do limite para  $PM_{2,5}$ , coincidindo com a realização das atividades no momento da medição.

Em termos de variabilidade espacial dos níveis de  $PM_{2,5}$ , foi identificado um padrão de certa forma expectável, evidenciando uma prevalência de valores mais elevados dentro do perímetro da zona industrial em comparação com os da envolvente próxima. A principal razão dessa diferença foi atribuída à maior intensidade de tráfego automóvel. A influência do tráfego rodoviário também se fez sentir na evolução dos níveis de  $PM_{2,5}$  ao longo do dia, tendo sido detectados níveis mais elevados nas horas de ponta.

A caracterização temporal e espacial das concentrações realizadas neste estudo pode ser vista como primeiro passo para trabalhos futuros como: monitorização de outros poluentes emitidos ( $CO$ ,  $NO_x$ ,  $COVs$ ,  $PM_{10}$  e  $NO_2$ ), monitorização prolongada e amostragem realizada com maior número de pontos, identificação de fontes emissoras com conhecimentos de processos, efeitos das variáveis meteorológicas na concentração (precipitação, velocidade e direção do vento, humidade relativa), a realização da modelação na distribuição espacial com dados de volume do tráfego diário, variáveis populacionais e informação sobre cobertura e uso da terra (topografia, relevo, altitude e solo), relacionar com características estruturais e de

funcionamento da área de estudo. Sendo assim, podendo estabelecer parâmetros para avaliar a relação desse poluente com efeitos na saúde da população na área envolvente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alejandro G., Francisco G., Mariano, Marcos B. (2018). Smart eco-industrial parks: A circular economy implementation based on industrial metabolism. *Recursos, Conservação e Reciclagem*, 135, p. 58-69.

Allenby, B.R. (1999). *Industrial Ecology: Policy Framework and Evaluation*. Prentice Hall, Eaglewood Cliffs, NJ.

Allenby, B.R. (1996). A design for environment methodology for evaluating materials. *Total Quality Environmental Management*, 5, p.69–84.

Almeida, S.M. (2004). *Composição e origem do aerossol atmosférico em zona urbano-industrial*. Tese de doutoramento. Universidade de Aveiro, Portugal.

Alves, C. (2005). Aerossóis Atmosféricos: Perspectiva Histórica. Fontes. Processos Químicos de Formação e Composição Orgânica. *Química Nova*, 28, p. 859-870.

Alves, C. (2001). *Poluição fotoquímica no nordeste de Portugal: origem, transporte e dispersão*. Tese de Doutoramento. Universidade de Aveiro, Portugal.

Alvim, S.D. (2011). Studies of the volatile organic compounds precursors of ozone in São Paulo city. *Eng. Sanit. Ambient.*, 16, p.1413-4152.

APA - Agência Portuguesa de Ambiente. (2011). Emissões de Poluentes Atmosféricos por Concelho: Gases acidificantes e eutrofizantes, precursores de ozono, partículas, metais pesados e gases com efeito de estufa.

Arbex, M. A., Cançado, J. E. D., Almeida, L. A. A. (2004). Queima de Biomassa e Efeitos sobre a Saúde. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, p. 1-18.

Arbex, M. A., Santos, U. D P. S., Martins, L. C., Saldiva, P. H. N., Pereira, L. A. A., Braga, A. L. F. (2012). A Poluição do Ar e o Sistema Respiratório. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, 38, p. 643-655.

Araujo, E. S., *et al.* (2017). Ecologia Industrial: um pouco de história. Disponível em: <http://www.hottopos.com/regeq12/art2.htm>.

Araujo, R.P.D. (2008). *Monitorização da Qualidade do Ar na Envolvente de Indústrias Cimenteiras*. Universidade Nova de Lisboa, Portugal. Dissertação de mestrado. Disponível em: <https://bit.ly/2JsuMMI>.

Baird, C. (2002). *Química ambiental*, 2, p.622.

Barron, J., Denning, A. S. (1993). The influence of mountain meteorology on precipitation chemistry at low and high elevations of the Colorado Front Range, U.S.A. *Atmospheric Environment*, 27, p.2337-2347.

Braga, B. (2002). *Introdução à Engenharia Ambiental*. Prentice Hall, São Paulo.

Brand, E., Bruijn, T. (1999). Shared responsibility at the regional level: the building of sustainable industrial estates. *European Environment* 9, p.221–231.

Borrego, C., Techepele, O., Barros, N., Miranda, A. I. (2010). Impact of road traffic emissions on air quality of the Lisbon region. *Atmospheric Environment*, p.4683-4690.

Burström, F., Korhonen, J. (2001). Municipalities and industrial ecology: reconsidering municipal environmental management. *Sustainable Development* 9, p.36–46.

Cao, J.J., Zhu, C.S., Chow, J.C., Watson, J.G., Han, Y.M. (2009). Black carbon relationships with emissions and meteorology in Xi'an, China. *Atmospheric Research*, 94, p. 194-202.

Carvalho, J. A., Lacava, P. T. (2003). Emissões em processos de combustão. *Rev. Unesp*, 11, p.21- 52.

Carvalho W., et al. (2013). *Dispersão de poluentes na cidade de São José dos Campos*. INPE, p.1-6.

Chang, A.T., Michael W.C. (2003). Indoor-outdoor air quality relationships in vehicle: effect of driving environment and ventilation modes. *Atmospheric Environment*, 37, p. 3795-3808.

Chertow, M.R. (1999). The eco-industrial park model reconsidered. *Journal of Industrial Ecology*, 2, p.8-10.

Chertow, M.R. (2000). Industrial symbiosis: literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and Environment* 25, p.313–337.

Chertow, M.R. (2007). Uncovering Industrial Symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, 11.

Chertow, M. (2008). Industrial ecology in a developing context. In: Clini, C., Musu, I., Gullino, M. (Eds.). *Sustainable Development and Environmental Management SE*, 24, p.335-349.

CCDR/LVT - Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo). (2012). Ambiente - Qualidade do ar. Disponível em: <http://www.ccdr-lvt.pt/pt/qualidade-do-ar/7133.htm#3>.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. (2005). Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo. DDRI – Disponível em: <http://ar.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-relatorios/>.

David, C., Karl, R. (2012). Tools for the Analysis of Air Pollution Data: Package “openair”. *Environmental Modelling & Software*, 28, p. 52-61.

Dangelico, R., Pontraddo, P. (2010). From green product definitions and classifications to the Green Option Matrix. *Journal of Cleaner Production*, 108, p.1608-1628.

De Santis, F., Fino, A. et al. (2003). Monitoring the air quality around an oil refinery through the using of diffusive sampling. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 378, p.782-788.

Den Hond, F. (2000). Industrial ecology: a review. *Regional Environmental Change*, 1, p.60–69.

DGA - Direção Geral do Ambiente. (2000). Relatório do Estado do Ambiente, Poluição do ar e doenças respiratórias: uma revisão. *Caderno de Saúde Pública*, 8, p.50-60.

Dunn, B.C., Steinemann, A. (1998). Industrial ecology for sustainable communities. *Journal of Environmental Planning and Management* 6, p.661–672.

EEA - European Environment Agency. (2010). Air quality in Europe. Disponível em: <https://bit.ly/2mobLC8>.

EEA - European Environment Agency. (2012). Air quality in Europe. Disponível em: <https://bit.ly/2LdvPFj>.

EEA - European Environment Agency. (2013). Air quality in Europe. Disponível em: <https://bit.ly/2uGTT94>.

EEA - European Environment Agency. (2015). Air quality in Europe. Disponível em: <https://bit.ly/2L03GC5>.

EEA - European Environment Agency. (2017). Air quality in Europe. Disponível em: <https://bit.ly/2uBbi37>.

Erkman, S. (1997). Industrial Ecology: an historical view. *Journal of Cleaner Production*, 5, p.13-23.

Ekebergh, J. (2014). Evaluating the infiltration of outdoor black carbon into residential indoor environments in Stockholm, Sweden. Relatório de projeto em ciência ambiental, *Department of Applied Environmental Science*.

Fan, J., Hu, S., Chen, D., Zhou, Y. (2017). Study on the construction and optimization of a resource-based industrial ecosystem. *Resources, Conservation and Recycling*, 119, p. 97-108.

Ferreira, J.A, Anjos, L.A. (2001). Aspectos de saúde coletiva e ocupacional associados à gestão dos resíduos sólidos municipais. *Cad. Saude Publica*, 17, p.689- 696.

- Feng, X., Wang, S. (2012). Influence of different weather events on concentrations of particulate matter with different sizes in Lanzhou, China. *J. Environmental Scientific*, 24, p. 665 – 674.
- Filho, D., Junior, J. (2009). Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). *Revista Política Hoje*, 18, p. 115-146.
- Frosch, A., Gallopoulos, N.E. (1989). *Strategies for manufacturing*, p.261.
- Fuzzi, S., Baltensperger, U., Carslaw, K., Decesari, S., Denier, H. (2015). Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, p. 8217-8299.
- Gao, S. *et al.*, (2016). Spatial statistics of atmospheric particulate matter in China. *Atmospheric Environment*, 134, p.162–167.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N.M.P, Hultink, E.J. (2017). A economia circular - um novo paradigma de sustentabilidade? *Journal Clean. Prod.*, 143, p.757-768.
- Gerharz, L.E., Krüger, A., Klemm, O. (2009). Applying indoor and outdoor modeling techniques to estimate individual exposure to PM<sub>2.5</sub> from personal GPS profiles and diaries: a pilot study. *Science of the Total Environment*, 407, p. 5184-5193.
- Gertler, N. (1995). *Industrial Ecosystems: Developing Sustainable Industrial Structures*, Massachusetts Institute of Technology (MIT).
- Guo, S. *et al.* (2014). Elucidating severe urban haze formation in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 11, p. 17373–17378.
- Gieray, R., Lammel, G., Metzger, G., Wieser, P. (1993). Size dependent single particle and chemical bulk analysis of droplets and interstitial particles in an orographic cloud. *Atmospheric Research*, 30, p. 263-293.
- Klepeis, N.E. (2006). Modeling human exposure to air pollution. *Human Exposure Analysis*, p. 1- 18.
- Koniecznyński, J., Zubek, E., Jabłńska, M. (2012). The Release of Trace Elements in the Process of Coal Coking. *The Scientific World Journal*, 15, p.70-82.
- Krecl, P., Targino, A., Landi, T., Ketzler, M. (2018). Determination of black carbon, PM<sub>2.5</sub>, particle number and NO<sub>x</sub> emission factors from roadside measurements and their implications for emission inventory development. *Atmospheric Environment*, 186, p.229-240.
- Hammond, A. L. (1994). *World Resource*. Tese de Doutorado. Oxford University, New York.

Harrison, R.M., Yin, J., Mark, D., Stedman, J., Appleby, R.S. (2001). Studies of the coarse particle (2.5–10µm) component in UK urban atmospheres. *Atmospheric Environment*, 35, p. 3667-3679.

Hawken, P., Lovins, A., Lovins, H. (1999). *Capitalismo natural*. Disponível em: <http://www.pensamento-cultrix.com.br>.

He K., Huo, H., Zhang, Q., He, D., An, F., Wang, M.P. (2005). Walsh Oil consumption and CO<sub>2</sub> emissions in China's road transport: current status, future trends, and policy implications. *Energy Policy*, 33, p.1499-1507.

IIASA - International Institute for Applied Systems. (2005). *Baseline Scenarios for the Clean Air for Europe (CAFE) Programme. Final report*. Disponível em: <http://www.iiasa.ac.at/web/home/resources/publications/annual-report/ar05.pdf>.

IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (2016). Disponível em: <https://bit.ly/2JpLqg1>.

INE – Instituto Nacional de Estatística. (2013). Nuts 2012: the new territorial units for statistics. Disponível: [https://www.Ine.Pt/xportal/xmain?Xpid=ine&xpgid=ine\\_publicacoes&publicacoespub\\_boui=230205992&publicacoesmodo=2&xlang=en](https://www.Ine.Pt/xportal/xmain?Xpid=ine&xpgid=ine_publicacoes&publicacoespub_boui=230205992&publicacoesmodo=2&xlang=en).

INE - Instituto Nacional de Estatística. (2014). Nuts 2013: the new territorial units for statistics. Disponível: [https://www.Ine.Pt/xportal/xmain?Xpid=ine&xpgid=ine\\_publicacoes&publicacoespub\\_boui=230205992&publicacoesmodo=2&xlang=en](https://www.Ine.Pt/xportal/xmain?Xpid=ine&xpgid=ine_publicacoes&publicacoespub_boui=230205992&publicacoesmodo=2&xlang=en).

INE - Instituto Nacional de Estatística. (2015). Nuts 2014: the new territorial units for statistics. Disponível: [https://www.Ine.Pt/xportal/xmain?Xpid=ine&xpgid=ine\\_publicacoes&publicacoespub\\_boui=230205992&publicacoesmodo=2&xlang=en](https://www.Ine.Pt/xportal/xmain?Xpid=ine&xpgid=ine_publicacoes&publicacoespub_boui=230205992&publicacoesmodo=2&xlang=en).

INE - Instituto Nacional de Estatística. (2017). Nuts 2016: the new territorial units for statistics. Disponível: [https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpgid=ine\\_main&xpid=INE&xlang=pt](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpgid=ine_main&xpid=INE&xlang=pt).

IEA- International Energy Agency. (2016). Disponível em: <https://bit.ly/2Lr8AV4>.

Jayaratne, R., Liu, X., Thai, P., Dunbabin, T., Morawska, L. (2018). The Influence of Humidity on the Performance of Low-Cost Air Particle Mass Sensors and the Effect of Atmospheric Fog. *Atmospheric Measurement Techniques*, 40, p.15-24.

Künzli, N., Perez, L., Rapp, R. (2010). *Air quality and health*. Switzerland: European Respiratory Society.

- Lee, C., *et al.* (2009). Particulate organic matter and ballast fluxes measured using time-series and settling velocity sediment traps in the northwestern Mediterranean Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56, p.1420-1436.
- Lowe, E.A., (2001). Eco-industrial Park Handbook for Asian Developing Countries. *Report to Asian Development Bank*.
- Lindau, F. G. (2011). *Estudo da qualidade do ar na região urbana de Porto Alegre: variabilidade nas concentrações do parâmetro partículas inaláveis*. Tese Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Martins, Leila Droprinchinski. (2006). *Sensibilidade da formação do ozônio troposférico às emissões veiculares na Região Metropolitana de São Paulo*. Tese Doutorado., Universidade de São Paulo, São Paulo.
- McDonald, A.G., Bealey, W.J., Fowler, D., Dragosits, U., Skiba, U., R.I. (2007). Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM<sub>10</sub> in two UK conurbations. *Atmospheric Environment*, 41, p. 8455-8467.
- Mirasgedis, S., Hontou, V. et al. (2008). Environmental damage costs from airborne pollution of industrial activities in the greater Athens, Greece area and the resulting benefits from the introduction of BAT. *Environmental Impact Assessment Review*, 28, p.39-56.
- Monteiro, A., *et al.* (2015). Air quality over Portugal in 2020. *Atmospheric Pollution Research*, 6, p.788-796.
- Morawska, L., Ristovski, Z., Jayaratne, E.R., Keogh, D.U., Ling, X. (2008). Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: Characteristics, ambient processing and implications on human exposure. *Atmospheric Environment*, 42, p. 8113-8138.
- Moreira, D., Tirabassi, T., Moraes, M. (2008). Meteorologia e poluição atmosférica. *Ambiente e sociedade*, 11, p.1-13.
- Moroco, J. (2003). *Análise Estatística de dados – com utilização do SPSS*. Lisboa: Editora Sílabo.
- Mucelin, C.A, Bellini, M. (2008). Lixo e Impactos ambientais perceptíveis no Ecosistema Urbano. *Sociedade & Natureza*, 20, p.111-124.
- Nowak, D.J., Rowntree, R.A., McPherson, G.E. (1994). Chicago's urban forest ecosystem: results of the Chicago Urban Forest Climate Project. *USDA General Tech. Rep.*, 186, p. 63-81.
- Ntasiou, M, Andreou, E. (2017). The Standard of Industrial Symbiosis. Environmental Criteria and Methodology on the Establishment and Operation of Industrial and Business Parks. *Procedia Environmental Sciences* 38, p.744 – 751.

- Pandey, R. (2005). Estimativa de poluição industrial setorial e geográfica Inventários na Índia: implicações para o uso de carga de efluentes versus regulação. *J. Dev. Viga*, 41, p.33-61.
- Parini, Claudemir José. (2003). *Estudo Comparativo de Métodos de Determinação do Tamanho de Partícula*. Dissertação Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Pant, P., *et al.* (2015). Characterization of ambient PM<sub>2.5</sub> at a pollution hotspot in New Delhi, India and inference of sources. *Atmospheric Environment*, 109, p.178-189.
- Park, H.S., Behera, S.K. (2014). Methodological aspects of applying eco-efficiency indicators to industrial symbiosis networks. *J. Clean. Prod.*, 64, p.478-485.
- Pilouk, S., Thammarat, K. (2017). Environmental performance indicators as the key for eco-industrial parks in Thailand. *Journal of Cleaner Production*. 156, p.614-623.
- Pomponi, F., Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, 143, p. 710-718.
- Ramanathan, V., Ramana, M. V., Roberts, G., Kim, D., Corrigan, C., Chung, C. (2007) Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption. *Nature*, p.448-575.
- Rangel, M. C., & Carvalho, M. (2003). Impacto dos catalisadores automotivos no controle da qualidade do ar. *Química Nova*, 26, p.265-277.
- Resende, F. (2007). *Poluição Atmosférica por Emissão de Material Particulado: Avaliação e Controle nos Canteiros de Obras de Edifícios*. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Richards, D.J., Allenby, B.R., Frosch, G. (1994). The greening of industrial ecosystems. In: Allenby, B.R., Richards, D.J. *The Greening of Industrial Ecosystems*. *National Academy*, p.1–19.
- Rojas, C. S. (2013). *Condições meteorológicas e níveis de poluição na região metropolitana de Lima Perú*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Romero, E., Ruiz, M. (2014). Proposal of an agent-based analytical model to convert industrial areas in industrial eco-systems. *Science of the Total Environment*, 15, p. 394-405.
- Saebo, A., Popek, R., Nawrot, B., Hanslin, A.H., Gawronska, H. Gawronski, S.W. (2012). Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of The Total Environment*, 427, p. 347-354.
- Saikku, L. (2006). Eco-industrial parks: A background report for the eco-industrial park project at Rantasalmi.
- Seinfeld, J. H. (1975). *Air pollution, Physical and chemical fundamentals*. McGraw Hill Book Co. p. 515. New York.

Seinfeld, J.H.; Pandis, S.N. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. New York

Shataloff, A. (2013). *Avaliação da Qualidade do Ar na Região de Setubal*. Dissertação de Mestrado.

Shusterman, D. (2011). The effects of air pollutants and irritants on the upper airway. *Proc Am Thorac Soc*, 8, n.1, p.101-105.

Shataloff, A. (2013). *Avaliação da Qualidade do Ar na Região de Setubal*. Dissertação de mestrado. Instituto Superior de Educação e Ciência, Portugal. Disponível em: <https://bit.ly/2Llxg1j>.

Spicer, A. (1971). *Tropical Sc.* 13, p.239.

Stern, Arthur C. (1968). Air Pollution National Center for Air Pollution Control United States Department of Health. *Education, and Welfare Washington, D.C.*

Tanimoto, A.H. (2004). *Proposta de Simbiose Industrial para minimizar os resíduos sólidos no Polo Petroquímico de Camaçari*. Dissertação Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Salvador. Disponível em: [http://www.teclim.ufba.br/site/material\\_online/dissertacoes/dis\\_armando\\_h\\_tanimoto.pdf](http://www.teclim.ufba.br/site/material_online/dissertacoes/dis_armando_h_tanimoto.pdf).

Thermo Electron Corporation Environmental Instruments. (2004). ADR 1200S. Disponível em: [http://www.equipcoservices.com/pdf/manuals/thermo\\_adr1200s.pdf](http://www.equipcoservices.com/pdf/manuals/thermo_adr1200s.pdf).

Torres, F. T. P.; Rocha, G. C.; Ribeiro, G. A. (2008). Geociência Aplicada – Diferentes Abordagens. *Geographica*, 3, p. 25-34.

Torres, P., *et al.* (2018). Air pollution: A public health approach for Portugal. *Science of The Total Environment*, 643, p.1041-1053.

USEPA. Compendium Method TO-15A (2015). Determination of Volatile Organic Compounds (VOC) in Air Collected in Specially-Prepared Canisters And Analyzed by Gas Chromatography/ Mass Spectrometry, Center for Environmental Research Information, 2th ed.

Valle, C. E. (1995). Qualidade ambiental: como ser competitivo protegendo o meio ambiente: (como se preparar para as normas ISO 14000, *Pioneira*, 117.

Vallero, D. (2008). *Fundamentals of Air Pollution*. 4th ed. Academic Press: North Carolina.

Valentino, S., *et al.* (2016). Maternal exposure to diluted diesel engine exhaust alters placental function and induces intergenerational effects in rabbits. *Particle and Fibre Toxicology*, 13, p.74-82.

Wakefield, S.J. Elliott, D.C. Cole, J.D. (2001). Eyles Environmental risk and (re)action: air quality, health, and civic involvement in an urban industrial neighbourhood. *Health & Place*, 7, p. 163-177.

WHO - World Health Organization. (1979). Sulphur oxides and suspended particulate matter. Geneva.

WHO - World Health Organization. (2000). Chapter 7.3 Particulate matter, Air Quality Guidelines – (2nd ed.) Regional Office for Europe, Copenhagen.

WHO – World Health Organization. (2009). Global health risks. Mortality and Burden of Disease Attributable to Selected Major Risks. Geneva: World Health Organization.

WHO – World Health Organization. (2016). 9 out of 10 people worldwide breathe polluted air, but more countries are taking action: World Health Organization.

Wang, Y., Fan, S., Wang, S. (2005) Chemiluminescence determination of nitrogen oxide in air with a sequential injection method. *Analytica Chimica Acta*, 541, p.129-134.

Yi, L., *et al.* (2012). Ecological Network Analysis for a Low-Carbon and High-Tech Industrial Park. *The Scientific World Journal*, 2012, p.1-9.

Yin, S., Shen, Z., Zhou, P., Zou, X., Che, S. (2011). Quantifying air pollution attenuation within urban parks: an experimental approach in Shanghai, China. *Environment Pollution*, 159, p. 2155-2163.

Zhu, T., *et al.* (2012). WMO/IGAC impacts of megacities on air pollution and climate. *Urban Climate*, 41, p.41-52.