

Mestrado Integrado em Engenharia Química

***Quantificação de Emissões Atmosféricas  
Na Indústria de Painéis de Derivados da Madeira***

Tese de Mestrado

Projecto de Desenvolvimento em Ambiente Empresarial

João Filipe Barroso Lima



**Departamento de Engenharia Química**

*Orientador na FEUP:* Prof. Adélio Mendes  
*Orientador na empresa:* Eng.º Carlos Tavares Ferreira

**Julho de 2009**

---



## Agradecimentos

Gostaria de expressar a minha sincera gratidão ao Eng.º Carlos Tavares Ferreira e ao Professor Adélio Mendes, meus orientadores empresarial e académico, pelo apoio incondicional e orientação ao longo deste trabalho. O seu encorajamento e paciência, bem como as suas sugestões, deram-me muita confiança e foram determinantes na realização deste trabalho.

Particularmente ao Eng.º Carlos Tavares Ferreira gostaria de lhe agradecer pela oportunidade de realizar este projecto de conclusão do mestrado integrado em Engenharia Química numa empresa de renome como a Sonae Indústria. Esta experiência permitiu-me um contacto directo com o universo empresarial e aplicação dos conhecimentos adquiridos durante a minha formação no mundo “real”.

Também gostaria de agradecer à Filipa Miranda, ao Hélder Ramos, ao Luís Ferraz, ao Pedro Marujo e ao Eng.º Pinto de Sousa, membros do centro cooperativo da Sonae Indústria, pela sua atenção e auxílio na minha integração ao ambiente empresarial, bem como na realização deste trabalho.

Os meus sinceros agradecimentos ao Sr. Luís Filipe Nunes e Eng.º Francisco Leitão pela sua disponibilidade e acompanhamento durante as visitas guiadas às unidades de Oliveira do Hospital e de Mangualde, respectivamente.

Estou agradecido à Dr.ª Conceição Carvalhas e à Eng.ª Susana Grilo, responsáveis pela área ambiental das unidades de Oliveira do Hospital e de Mangualde, pela informação fornecida relativamente às emissões atmosféricas de ambas as unidades.

Também gostaria de agradecer à Ana Isabel Fonseca, membro do Planeamento e Controlo de Gestão da Sonae Indústria, pela sua ajuda na obtenção de toda informação que este trabalho exigia.

Gostaria de apresentar os meus sinceros agradecimentos ao Professor Romualdo Salcedo por partilhar os seus conhecimentos e experiência na sua área de especialização (emissões atmosféricas).

E por último, gostaria de agradecer encarecidamente aos meus pais, Manuel Lima e Maria de Fátima Lima, e ao meu irmão, Tiago Lima, pelo seu apoio incondicional e compreensão ao longo de toda a minha vida.

---

## Apresentação da Sonae Indústria



A Sonae Indústria é uma empresa de dimensão mundial, sendo constituída por 34 unidades fabris distribuídas por 4 continentes (Europa, África, América do Norte e do Sul), e 9 países (Portugal, Espanha, França, Alemanha, Suíça, Reino Unido, África do Sul, Canadá e Brasil). A última unidade fabril adquirida foi a de Darbo (França) em 2006.

Os seus produtos são comercializados em 92 países e a capacidade produtiva total de painéis derivados de madeira é superior a 10 milhões de m<sup>3</sup> por ano, sendo actualmente uma das maiores produtoras e líderes mundiais do mercado painéis derivados de madeira.



*Figura a) - Imagem representativa da unidade fabril da Sonae Indústria em Mangualde.*

As unidades da Sonae Indústria produzem essencialmente, 3 tipos de produtos: o aglomerado de fibras de média densidade (*MDF - Medium Density Fiberboard*), o aglomerado de partículas (*PB - Particleboard*) e o aglomerado de fibras longas e orientadas (*OSB - Oriented Strand Board*).

Em Portugal, somente os dois primeiros são produzidos, sendo o MDF e PB produzidos em Mangualde e Oliveira do Hospital, respectivamente. Por sua vez, o OSB é fabricado unicamente nas unidades fabris de *Chatelleraut* (França) e de *Nettgau* (Alemanha) da Sonae Indústria.

## Resumo

No âmbito da implementação da sua política de gestão ambiental, a Sonae Indústria assumiu vários compromissos relativamente à operação das suas unidades fabris. Além do estrito cumprimento da legislação em vigor, esta empresa comprometeu-se a diminuir continuamente o impacto ambiental das suas unidades fabris e a fazer a sua divulgação pública. Para tal, a Sonae Indústria estabeleceu diversos indicadores relativos às emissões atmosféricas das suas unidades, nomeadamente, emissões de CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, partículas, COVs e metais pesados (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn).

A quantificação das emissões atmosféricas pode ser realizada pela aplicação de diversas metodologias internacionalmente aceites, designadamente: a) “balanço material”; b) “amostragem”; c) “sistema de monitorização de emissões em contínuo” (*CEMS - Continuous Emissions Monitoring System*); d) “sistema preditivo de monitorização de emissões” (*PEMS - Predictive Emissions Monitoring System*); e) “análise de combustível” e f) “factores de emissão”. O tipo de metodologia a aplicar depende da informação pretendida e do poluente em estudo. Por diversas razões, ao longo deste trabalho foram aplicadas, as metodologias “factores de emissão”, “análise de combustível” e “PEMS”.

A metodologia “factores de emissão”, usualmente utilizada na Indústria, é de aplicação simples. No caso em apreço, esta metodologia exige apenas o conhecimento dos dados do consumo de combustível usado nas caldeiras, do caudal mássico de madeira seca originado no sistema de secagem e do volume de painéis produzidos por prensagem.

A metodologia “análise de combustível” produz resultados quantitativamente semelhantes à dos “factores de emissão”, no entanto a primeira apenas quantifica as emissões de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>.

Por outro lado, o “PEMS” envolve o desenvolvimento de regressões entre as emissões dos vários poluentes e outras variáveis de operação. A aplicação desta metodologia compreende um processo matemático e estatístico complexo.

Das três metodologias em estudo, a metodologia “factores de emissão” tem grandes vantagens e foi seleccionada para quantificar as emissões atmosféricas das unidades fabris da Sonae Indústria. Contudo, para a sua implementação definitiva é necessário determinar os factores de emissão específicos dos vários equipamentos. Para tal, foi estabelecido um procedimento que poderá ser realizado numa etapa futura.

**Palavras-chave (Tema):** Emissões Atmosféricas, Metodologias de Quantificação de Emissões, Ambiente.

---

## Abstract

According to the implementation of its environmental management policy, Sonae Indústria made several compromises relating the operation of its plants. In addition to the strict compliance of the existing legislation, the company pledged to disclosure and to continually minimize the environmental impact of its plants. To this end, Sonae Indústria established several indicators, in order to quantify the air emissions from its plants, including CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, particulate matter, VOCs and heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn) emissions.

The quantification of air emissions can be achieved applying several internationally accepted methodologies, namely: a) “mass balance”; b) “sampling”; c) “Continuous Emissions Monitoring System” (*CEMS*); d) “Predictive Emissions Monitoring System” (*PEMS*); e) “fuel analysis” and f) “emission factors”. The type of methodology to apply depends on the required information and the type of pollutant. For various reasons, throughout this work, were only applied the following methodologies: “emission factors”, “fuel analysis” and “*PEMS*”.

The application of “emission factors” methodology, commonly used in industry, is a simple procedure. In this case, this methodology only requires fuel consumption data; the outlet mass flow of dry wood in the dryer and volume flow of boards produced by pressing.

The “fuel analysis” methodology produce results quantitatively identical to the “emissions factors” methodology, however the first one only quantifies CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> emissions.

Moreover, the “*PEMS*” involves the development of regressions between pollutants emissions and other operation variables. The application of this methodology is a complex mathematical and statistical process.

For the three methodologies under study, the “emission factors” methodology has great advantages and must be selected to quantify the air emissions from Sonae Indústria’s plants. However, to implement it, it’s necessary to determinate the emission factors for various equipments. To this end, has been established a procedure which may be performed in the near future.

**Keywords (Theme):** Air Emissions, Methodologies for Quantifying Emissions, Environment.

---

# Índice

## Índice de Conteúdos

Índice .....	i
Índice de Conteúdos .....	i
Índice de Tabelas .....	iv
Índice de Figuras .....	vi
Notação e Glossário .....	ix
Variáveis .....	ix
Índices de contagem .....	x
Nomenclatura .....	xi
1 Introdução. ....	1
1.1 Enquadramento e Apresentação do Projecto .....	1
1.2 Objectivos do Projecto.....	5
1.3 Descrição de Actividades .....	4
1.4 Contributos do Trabalho .....	5
1.5 Organização da Tese .....	6
2 Estado da Arte.....	7
2.1 Metodologia “balanço material”.....	7
2.2 Metodologia “sistema de monitorização de emissões em contínuo” .....	8
2.3 Metodologia “amostragem” .....	9
2.4 Metodologia “análise de combustível” .....	10
2.5 Metodologia “factores de emissão” .....	11
2.6 Metodologia “sistema preditivo de monitorização de emissões” .....	12
2.7 Metodologias preferenciais e alternativas de estimativa de emissões atmosféricas.	13
2.8 Selecção de Metodologias .....	15
3 Descrição Técnica e Discussão dos Resultados .....	17
3.1 Metodologia “factores de emissão” .....	17

---

3.1.1	Emissões Globais .....	18
3.1.2	Emissões Locais.....	20
3.1.3	Estudo dos resultados obtidos após aplicação da Metodologia “factores de emissão” .....	22
3.2	Metodologia “análise de combustível”.....	23
3.2.1	Emissões globais.....	24
3.2.2	Emissões locais .....	24
3.2.3	Análise comparativa entre as metodologias “factores de emissão” e “análise de combustível” .....	25
3.3	Metodologia “sistema preditivo de monitorização de emissões” .....	26
3.3.1	Mangualde.....	27
3.3.1.1	Unidades de combustão .....	27
3.3.1.2	Unidades de secagem.....	31
3.3.1.3	Unidades de prensagem .....	33
3.2.1	Oliveira do Hospital.....	35
3.2.1.1	Unidades de combustão .....	35
3.2.1.2	Filtros .....	38
3.4	Proposta de Metodologia.....	40
4	Conclusões .....	41
5	Avaliação do trabalho realizado .....	43
5.1	Objectivos Realizados .....	43
5.2	Outros Trabalhos Realizados .....	43
5.3	Trabalho Futuro .....	43
5.4	Apreciação final.....	43
	Referências .....	44
	Anexo I - Diagrama processual de produção de Aglomerado de partículas.....	46
	Anexo II - Diagrama Processual de produção de aglomerado de fibras de média de densidade . .....	47



---

Anexo III - Análise dos coeficientes de variação com os parâmetros de operação para as instalações de combustão, secagem e prensagem para a unidade fabril de Mangualde .....	48
Anexo IV - Análise dos coeficientes de variação com os parâmetros de operação para as instalações de combustão e filtros para a unidade fabril de Oliveira do Hospital .....	56
Anexo V - Determinação do factor de emissão .....	61
Procedimento experimental.....	61
Determinação do Factor de Emissão .....	62
Anexo VI - Folha de Inventário de Emissões Atmosféricas .....	64
Anexo VII - Regressões lineares uni-variável desenvolvidas para os focos de emissão estacionários das unidades fabris de Oliveira do Hospital e de Mangualde .....	66

## Índice de Tabelas

<i>Tabela 1 - Normas de referência para a determinação dos diferentes parâmetros.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabela 2 - Valores convencionais e gama de valores de factores de oxidação do carbono para os diferentes tipos de combustível. ....</i>	<i>10</i>
<i>Tabela 3 - Metodologias preferenciais e alternativos para a estimativa de emissões de cada poluente. ....</i>	<i>13</i>
<i>Tabela 4 - Metodologias aplicadas na quantificação das emissões atmosféricas para cada tipo de poluente.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabela 5 - Emissões globais do ano de 2008, em toneladas, por poluente, para as unidades fabris de Oliveira do Hospital e de Mangualde obtidas pela aplicação da Metodologia “factores de emissão”... </i>	<i>18</i>
<i>Tabela 6 - Emissões locais do ano de 2008, em toneladas, por poluente, da unidade fabril de Oliveira do Hospital previstas pela metodologia “factores de emissão”. ....</i>	<i>20</i>
<i>Tabela 7 - Emissões locais do ano de 2008, em toneladas, por poluente, da unidade fabril de Mangualde previstas pela metodologia de “factores de emissão”. ....</i>	<i>21</i>
<i>Tabela 8 - Comparação, por poluente, entre as emissões mensais globais experimentais e as obtidas pela aplicação da metodologia “factores de emissão”, em toneladas. ....</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 9 - Emissões globais do ano de 2008, por poluente, em toneladas, obtidas pela aplicação da metodologia “análise de combustível” para unidades fabris de Oliveira do Hospital e de Mangualde. </i>	<i>24</i>
<i>Tabela 10 - Emissões locais do ano de 2008, por poluente, em toneladas, obtidas pela aplicação da metodologia “análise de combustível” para unidades fabris de Oliveira do Hospital e de Mangualde. </i>	<i>24</i>
<i>Tabela 11 - Paralelismo entre as metodologias “factores de emissão” e “análise de combustível”. ..</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 12 - Parâmetro de operação seleccionado para prever a concentração e o caudal mássico de um determinado poluente e respectivo coeficiente de variância médio para as instalações de combustão de Mangualde. ....</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 13 - Parâmetro de operação seleccionado na previsão da concentração e do caudal mássico de um determinado poluente e respectivo coeficiente de variância médio para as instalações de secagem de Mangualde. ....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 14 - Parâmetro de operação seleccionado na previsão da concentração e do caudal mássico de um determinado poluente e respectivo coeficiente de variância médio para as instalações de prensagem de Mangualde. ....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 15 - Parâmetro de operação seleccionado na previsão da concentração e do caudal mássico de um determinado poluente e respectivo coeficiente de variância médio para as instalações de combustão de Oliveira do Hospital.....</i>	<i>37</i>

---

<i>Tabela 16 - Parâmetro de operação seleccionado na previsão da concentração e do caudal mássico de partículas e respectivo coeficiente de variância médio para os filtros de despoeiramento de Oliveira do Hospital.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 17 - Regressões lineares desenvolvidas para o motor de cogeração (MC) e caldeiras da 1ª (C1) e 2ª linhas de produção (C2). Os elementos da 1ª linha e da 1ª coluna correspondem à variável independente (x) e variável dependente (y), respectivamente. ....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 18 - Regressões lineares desenvolvidas para os 1º e 2º estágios do secador da 1ª linha de produção (S1E1 e S1E2) e secadores sifter norte e sifter sul da 2ª linha de produção (S2SN e S2SS). Os elementos da 1ª linha e da 1ª coluna correspondem à variável independente (x) e variável dependente (y), respectivamente.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 19 - Regressões lineares desenvolvidas para as seis chaminés de exaustão da 1ª linha de produção (P1C1, P1C2, P1C3, P1C4, P1C5 e P1C6) e duas chaminés de exaustão da 2ª linha de produção (P2E e P2S). Os elementos da 1ª linha e da 1ª coluna correspondem à variável independente (x) e variável dependente (y), respectivamente. ....</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 20 - Regressões lineares desenvolvidas para o WESP (W) e caldeira (C). Os elementos da 1ª linha e da 1ª coluna correspondem à variável independente (x) e variável dependente (y), respectivamente .....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 21 - Regressões lineares desenvolvidas para os filtros de despoeiramento nº1 e nº2 da lixadora (FL1 e FL2) e da formadora (FF1 e FF2). Os elementos da 1ª linha e da 1ª coluna correspondem à variável independente (x) e variável dependente (y), respectivamente.....</i>	<i>74</i>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> - Focos de emissão estacionários dos processos de combustão e secagem em Mangualde. ....	28
<b>Figura 2</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração de partículas para as diferentes instalações de combustão de Mangualde. ....	29
<b>Figura 3</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes ao caudal mássico de partículas para as diferentes instalações de combustão de Mangualde .....	29
<b>Figura 4</b> - Focos de emissão estacionários dos processos de prensagem de Mangualde. ....	33
<b>Figura 5</b> - Ilustração da chaminé da caldeira (C) em Oliveira do Hospital. ....	36
<b>Figura 6</b> - Ilustração da chaminé do precipitador electrostático húmido, WESP (W), em Oliveira do Hospital. ....	36
<b>Figura 7</b> - Ilustração das chaminés de exaustão dos filtros despoejamento da lixadora e da formadora em Oliveira do Hospital. ....	38
<b>Figura 8</b> - Diagrama Processual de produção do aglomerado de partículas (PB) em Oliveira do Hospital. ....	46
<b>Figura 9</b> - Diagrama Processual de produção do aglomerado de fibras de média densidade (MDF) em Mangualde. ....	47
<b>Figura 10</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de partículas para as diferentes instalações de combustão de Mangualde. ....	49
<b>Figura 11</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de CO para as diferentes instalações de combustão de Mangualde. ....	49
<b>Figura 12</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de SO <sub>2</sub> para as diferentes instalações de combustão de Mangualde. ....	50
<b>Figura 13</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de NO <sub>x</sub> para as diferentes instalações de combustão de Mangualde. ....	50
<b>Figura 14</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de COVs para as diferentes instalações de combustão de Mangualde. ....	51

---

<b>Figura 15</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de CO <sub>2</sub> para as diferentes instalações de combustão de Mangualde. ....	51
<b>Figura 16</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de partículas para as diferentes instalações de secagem de Mangualde. ....	52
<b>Figura 17</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de CO para as diferentes instalações de secagem de Mangualde. ....	52
<b>Figura 18</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de NO <sub>x</sub> para as diferentes instalações de secagem de Mangualde. ....	53
<b>Figura 19</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de COVs para as diferentes instalações de secagem de Mangualde. ....	53
<b>Figura 20</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de CO <sub>2</sub> para as diferentes instalações de secagem de Mangualde. ....	54
<b>Figura 21</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de partículas para as diferentes instalações de prensagem de Mangualde. ....	55
<b>Figura 22</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de COVs para as diferentes instalações de prensagem de Mangualde. ....	55
<b>Figura 23</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de partículas para as diferentes instalações de combustão de Oliveira do Hospital. ....	57
<b>Figura 24</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de SO <sub>2</sub> para as diferentes instalações de combustão de Oliveira do Hospital. ....	57
<b>Figura 25</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de NO <sub>x</sub> para as diferentes instalações de combustão de Oliveira do Hospital. ....	58
<b>Figura 26</b> - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de COV <sub>s</sub> para as diferentes instalações de combustão de Oliveira do Hospital. ....	58

---

- Figura 27** - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de CO para as diferentes instalações de combustão de Oliveira do Hospital..... 59
- Figura 28** - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de partículas para os diferentes filtros de despoiramento de Oliveira do Hospital. .... 60
- Figura 29** - Esquema representativo da regressão linear para obtenção do factor de emissão..... 63

## Notação e Glossário

### Variáveis

$E_x$	Emissão horária do poluente X	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
$C_{mX}$	Teor mássico médio do poluente X na matéria-prima	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
$Q_{mpe}$	Caudal mássico de matéria-prima à entrada	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
$Q_{mps}$	Caudal mássico de matéria-prima à saída	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
$Q_{mr}$	Caudal mássico de matéria-prima reciclada	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
$Q_{mc}$	Caudal mássico de matéria-prima reconvertida	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
$\eta_{\text{controlo}}$	Eficiência de remoção do equipamento de controlo	%
$C_x$	Concentração do poluente X no gás recolhido em base seca	$\text{ppmv}_{\text{seco}}$
$Q$	Caudal volumétrico seco recolhido	$\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$
$V$	Volume ocupado por uma mole de gás ideal nas condições de padrão de temperatura e pressão (CPPT) (a 0 °C e 0,1 MPa)	$\text{l}\cdot\text{mol}^{-1}$ (22,71)
$MM$	Massa molecular do poluente X	$\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$
$m_x$	Massa do poluente X no filtro	g
$V_m$	Volume da amostra de gás seco	$\text{m}^3$
$\%(m/m)$	Teor mássico do poluente X no combustível	%
$Q_{\text{combustível}}$	Caudal mássico de combustível	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
$MM_x$	Massa molecular do poluente emitido; por exemplo: CO <sub>2</sub>	$\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$
$MM_c$	Massa molecular do poluente no combustível; por exemplo: C	$\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$
$f.o$	Factor de oxidação	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}_{\text{combustível}}$ ou
$FE_x$	Factor de emissão de X	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}_{\text{combustível}}$ ou $\text{kg}\cdot\text{GJ}^{-1}_{\text{combustível}}$
$Q_m$	Caudal mássico do poluente emitido	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
$C_m$	Concentração do poluente no gás de exaustão	$\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$
$T$	Temperatura	°C
$P$	Pressão absoluta	kPa

$H$	Humidade absoluta	%
% $O_2$	Teor de $O_2$	%
$v$	Velocidade de exaustão	$m \cdot s^{-1}$
$Q_s$	Caudal volumétrico seco em condições normais de pressão e de temperatura	$mg \cdot Nm^{-3}$
$CV$	Coefficiente de Variância	%
$\bar{y}$	Valor médio dos pontos experimentais	
$S_{yx}^2$	Variância da regressão linear	
$y_i$	Valor da medição experimental	
$y_{cal}$	Valor da medição previsto pela regressão linear	
$n$	Número de pontos experimentais	
PTN	Condições normais de pressão e de temperatura (0 °C e 101,325 kPa)	
$Q_{madeiraseca}$	Caudal mássico de madeira seca à saída do secador	$ton \cdot h^{-1}$
$Q_{prensa}$	Caudal volumétrico de painéis produzidos na prensa	$m^3 \cdot h^{-1}$
$\Delta Q_i$	Incremento de variação	$ton \cdot h^{-1}$ ou $m^3 \cdot h^{-1}$

## Índices de contagem

$i$	Índice ou contador
$j$	Contador



## Nomenclatura

CQO	Carência Química de Oxigênio
CBO	Carência Bioquímica de Oxigênio
SST	Sólidos Suspensos Totais
N	Símbolo Químico do elemento Azoto
P	Símbolo Químico do Elemento Fósforo
C	Símbolo Químico do Elemento Carbono
CO <sub>2</sub>	Fórmula Química do Dióxido de Carbono
CO	Fórmula Química do Monóxido de Carbono
S	Símbolo Químico do Elemento Enxofre
SO <sub>2</sub>	Fórmula Química do Dióxido de Enxofre
SO <sub>3</sub>	Fórmula Química do Trióxido de Enxofre
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Fórmula Química do íão Sulfato
NO <sub>x</sub>	Fórmula Química dos Óxidos de Azoto
MP	Material Particulado ou Partículas
MP <sub>10</sub>	Partículas cujo diâmetro aerodinâmico é inferior a 10 µm
MP <sub>2,5</sub>	Partículas cujo diâmetro aerodinâmico é inferior a 2,5 µm
MP <sub>1,0</sub> /MP <sub>condensável</sub>	Partículas cujo diâmetro aerodinâmico é inferior a 1 µm
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
As	Símbolo Químico do Elemento Arsênio
Cd	Símbolo Químico do Elemento Cádmio
Cr	Símbolo Químico do Elemento Crômio
Cu	Símbolo Químico do Elemento Cobre
Hg	Símbolo Químico do Elemento Mercúrio
Ni	Símbolo Químico do Elemento Níquel
Pb	Símbolo Químico do Elemento Chumbo
Zn	Símbolo Químico do Elemento Zinco
O <sub>3</sub>	Fórmula Química do Ozono
O <sub>2</sub>	Fórmula Química do Oxigênio
EPA <sub>US</sub>	<i>Environment Protection Agency of United States of America</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>
WRI	<i>World Resources Institute</i>
NCASI	<i>National Council for Air and Stream Improvement</i>
CEN	Comité Europeu de Normalização
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>

---

MS	<i>Mass Spectrofotometry</i>
FID	<i>Flame Ionization Design</i>
OH	Oliveira do Hospital
MNG	Mangualde
CEMS	<i>Continuous Emissions Monitoring System</i>
PEMS	Predictive Emissions Monitoring System
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i> - Aglomerado de fibras de média densidade
PB	Particleboard - Aglomerado de partículas
MC	Motor de Cogeração <i>Wartsila</i>
C1	Caldeira da 1ª linha de produção de MDF em Mangualde
C2	Caldeira da 2ª linha de produção de MDF em Mangualde
S1E1	1º Estágio do secador da 1ª linha produção de MDF em Mangualde
S1E2	2º Estágio do secador da 1ª linha de produção de MDF em Mangualde
S2SN	Secado <i>sifter</i> norte da 2ª linha de produção de MDF em Mangualde
S2SS	Secado <i>sifter</i> sul da 2ª linha de produção de MDF em Mangualde
P1C1	1ª Chaminé da prensa da 1ª linha de produção de MDF em Mangualde
P1C2	2ª Chaminé da prensa da 1ª linha de produção de MDF em Mangualde
P1C3	3ª Chaminé da prensa da 1ª linha de produção de MDF em Mangualde
P1C4	4ª Chaminé da prensa da 1ª linha de produção de MDF em Mangualde
P1C5	5ª Chaminé da prensa da 1ª linha de produção de MDF em Mangualde
P1C6	6ª Chaminé da prensa da 1ª linha de produção de MDF em Mangualde
P2E	Chaminé à entrada da prensa da 2ª linha de produção de MDF em Mangualde
P2S	Chaminé à saída da prensa da 2ª linha de produção de MDF em Mangualde
W	WESP - <i>Wet ElectroStatic Precipitator</i> ; Precipitador electrostático húmido de Oliveira do Hospital
C	Caldeira da linha de produção de PB em Oliveira do Hospital
FL1	Chaminé do filtro da lixadora nº1 em Oliveira do Hospital
FL2	Chaminé do filtro da lixadora nº2 em Oliveira do Hospital
FF1	Chaminé do filtro da formadora nº1 em Oliveira do Hospital
FF2	Chaminé do filtro da formadora nº2 em Oliveira do Hospital

# 1 Introdução.

## 1.1 Enquadramento e Apresentação do Projecto

Actualmente vive-se um tempo de grandes desafios relacionados com a sustentabilidade do planeta; estes devem ser vistos como uma grande oportunidade para as empresas Portuguesas liderarem alguns destes desafios. A Sonae Indústria, um dos líderes mundiais na produção de derivados de madeira, está convencida que deve ter um papel activo nesse processo [14]. Na sua política de gestão ambiental focalizada na eco-eficiência, a Sonae Indústria, além do estrito cumprimento legal, assumiu inúmeros compromissos na operação das suas unidades fabris, entre os quais se destacam: a minimização do impacto ambiental das suas unidades no ambiente local e global e a divulgação pública do seu desempenho ambiental.

Numa perspectiva de actuação responsável na condução dos seus negócios, a Sonae Indústria tem vindo a caracterizar as interacções das suas unidades fabris com o meio ambiente, sendo a sua evolução quantificada através do uso de indicadores ambientais adequados. Os indicadores ambientais podem ser classificados como indicadores de custo ou indicadores físicos [13].

Os indicadores de custo contabilizam as despesas associadas: ao consumo de água municipal, superfície e subterrânea; ao tratamento e eliminação de água residual, resíduos perigosos e não perigosos e às taxas e custos de tratamento de emissões atmosféricas.

Por outro lado, os indicadores físicos quantificam: o consumo de água municipal, superfície e subterrânea; as descargas dos diferentes poluentes nos efluentes: Carência Química de Oxigénio (CQO), Carência Bioquímica de Oxigénio (CBO), Sólidos suspensos totais (SST), Azoto (N), Fósforo (P) e metais pesados; os resíduos usados como combustível; outros materiais reutilizados/reciclados perigosos e não perigosos e as emissões atmosféricas.

Actualmente, todos os indicadores físicos mencionados são divulgados, exceptuando, os indicadores associados à quantificação de emissões atmosféricas. A realização deste trabalho focaliza este último indicador [12].

Os processos de produção de painéis de derivados da madeira apresentam emissões de vários poluentes, nomeadamente, de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), óxidos de azoto ( $\text{NO}_x$ ), compostos orgânicos voláteis (COVs), partículas ou material particulado (MP) e metais pesados: Arsénio (As), Cádmio (Cd), Crómio (Cr), Cobre (Cu), Mercúrio (Hg), Níquel (Ni) Chumbo (Pb) e Zinco (Zn).

O  $\text{SO}_2$  resulta da oxidação do enxofre (S) contido nos combustíveis. No entanto, outros estados de oxidação também se formam, nomeadamente, o trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ ). Geralmente, mais de 95 % do enxofre do combustível é convertido em  $\text{SO}_2$ , sendo o restante

convertido em  $\text{SO}_3$  (1 a 5 %) e/ou sulfatos,  $\text{SO}_4^{2-}$ , (1 a 3 %) [11]. As emissões de  $\text{SO}_2$  podem ser reduzidas por alteração de combustível ou usando tecnologias de controlo pós-combustão, nomeadamente, a dessulfuração de gases por via húmida, seca ou semi-seca [4].

O  $\text{NO}_x$  resulta da fixação térmica do azoto atmosférico na combustão do ar ou da conversão química do azoto do combustível em  $\text{NO}_2$  e/ou  $\text{NO}$  [11]. As emissões de  $\text{NO}_x$  podem ser diminuídas por alteração de combustível (ex: substituição do gasóleo pelo gás natural) ou adicionando um mecanismo de controlo pós-combustão, nomeadamente, a redução catalítica e não-catalítica selectiva [2].

O  $\text{CO}_2$  e  $\text{CO}$  resultam dos processos de combustão. Este último forma-se quando a combustão é incompleta e as suas emissões podem ser minimizadas, controlando cuidadosamente o processo de combustão [22].

Os COVs são compostos orgânicos que reagem fotoquimicamente com os  $\text{NO}_x$  e  $\text{CO}$  para formar o Ozono ( $\text{O}_3$ ) [2]. De acordo com o Comité Europeu de Normalização (CEN), os COVs são "compostos que eluem entre o n-hexano e o n-hexadecano, excluindo o formaldeído, medidos numa câmara ou célula de ar de teste por amostragem activa usando o solvente Tenax, a desorção térmica e a cromatografia gasosa, juntamente, com o espectrofotómetro de massa (*MS - Mass Spectrofotometry*) ou ionização de chama (*FID - Flame Ionization Design*)" [1]. As tecnologias mais usadas na remoção de COVs são a oxidação térmica e catalítica regenerativa [3].

A emissão de material particulado (MP) está dividida em 3 subtipos, de acordo com o seu diâmetro aerodinâmico: as  $\text{MP}_{10}$ ,  $\text{MP}_{2,5}$  e  $\text{MP}_{\text{condensável}}/\text{MP}_{1,0}$  cujo diâmetro aerodinâmico é inferior a 10, 2,5, e 1  $\mu\text{m}$ , respectivamente [11]. A remoção de partículas pode ser realizada através de diferentes mecanismos, nomeadamente, por policlones, filtros de mangas, precipitador electrostático seco e húmido e por filtros húmidos [2].

A produção de painéis de derivados da madeira envolve várias operações processuais sequenciais. Primeiramente, a matéria-prima, a madeira, experimenta um tratamento inicial que consiste na trituração da madeira em estilha, na lavagem da estilha e na refinação (mistura da estilha com o material adesivo: resinas). Seguidamente, a estilha é direccionada para os secadores. A secagem é realizada pelos gases quentes produzidos nas caldeiras, nos motores de cogeração e nos queimadores de gás. Posteriormente, a estilha seca é transportada pneumáticamente para a unidade formadora na qual a estilha adquire a forma dum colchão. Este colchão, seguidamente, sofre um processo de pré-prensagem à temperatura ambiente e um processo de prensagem a quente e sob pressão. Desta forma, o colchão adopta a forma dum painel. E por último, este painel experimenta um tratamento final que envolve várias etapas sequenciais, nomeadamente, o corte e lixagem e o arrefecimento de placas. A descrição pormenorizada do processo de produção de painéis de derivados da madeira pode ser consultada no Anexo I e II.

Na indústria de painéis de derivados da madeira, as emissões de CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> provêm unicamente de fenômenos de combustão que ocorrem nos geradores de gases quentes (caldeiras e queimadores de gás natural) e nos motores de cogeração. Por outro lado, as emissões de partículas e COVs resultam essencialmente dos processos de secagem e prensagem [10].

Durante a realização deste trabalho, optou-se por quantificar as emissões atmosféricas em apenas 2 das 34 unidades da Sonae Indústria devido à facilidade de deslocação. Essas unidades foram a de Oliveira do Hospital (OH) e de Mangualde (MNG).

## 1.2 Descrição de Actividades

Com o objectivo de se proceder à quantificação das emissões atmosféricas das unidades de Oliveira do Hospital e de Mangualde, fez-se um levantamento das diversas metodologias internacionais existentes recorrendo essencialmente, à informação disponível na Agência de Protecção Ambiental dos Estados Unidos da América (*EPA<sub>US</sub> - Environment Protection Agency of United States of America*), no Painel Intergovernamental de Alterações Climáticas (*IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change*) e no Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (*WBCSD - World Business Council for Sustainable Development*).

Das diferentes metodologias existentes destacam-se: a) “balanço material”; b) “sistema de monitorização de emissões em contínuo” (*CEMS*); c) “amostragem”; d) “análise de combustível”; e) “factores de emissão”; e f) “sistema preditivo de monitorização de emissões” (*PEMS*). Devido a diversas razões, no decurso deste trabalho apenas as 3 últimas metodologias foram aplicadas na quantificação das emissões atmosféricas das unidades fabris de Mangualde e de Oliveira do Hospital.

Durante o estágio na Sonae Indústria, visitou-se as unidades fabris de Oliveira do Hospital e de Mangualde com objectivo de conhecer os processos de combustão, prensagem e secagem inerentes à produção dos painéis de derivados da madeira, bem como, identificar os vários focos de emissão dos diferentes poluentes nesses processos.

Na aplicação das metodologias “factores de emissão” e “análise de combustível” foi desenvolvido, para ambas, uma ferramenta de cálculo em *MSExcel* recorrendo a uma folha de cálculo do *WBCSD* e do *Conselho Nacional para melhoria de ar e rios (NCASI - National Council for Air and Stream Improvement)* que quantificava somente as emissões globais de CO<sub>2</sub> [18], [10]. Esta última foi totalmente reestruturada e adaptada para quantificar as emissões locais (caldeira, secador, prensa, cogeração...) de qualquer unidade fabril da Sonae Indústria e dos vários poluentes.

Por outro lado, na aplicação do “*PEMS*” foram desenvolvidas regressões entre as medições *in loco* das emissões de poluentes dos últimos três anos (duas por ano) e outras variáveis de processo (pressão, temperatura,...) para todos os focos de emissão estacionários das duas unidades fabris.

Finalmente, foi proposta uma metodologia global, coerente e consistente para quantificar as emissões atmosféricas das operações da Sonae Indústria. No entanto, o inventário de emissões para um trimestre de 2009 não foi realizado devido à inexistência de factores de emissão adequados e/ou carência de fiabilidade dos dados experimentais. Portanto, sugeriu-se um procedimento para determinar os factores de emissão específicos dos diversos equipamentos presentes na Sonae Indústria.

### 1.3 Objectivos do Projecto

Na realização deste projecto assumiu-se o cumprimento dos seguintes objectivos:

- Realizar um levantamento das diversas metodologias de quantificação de emissões atmosféricas internacionalmente aceites;
- Propor uma metodologia global, coerente e consistente para realizar o inventário contínuo de emissões atmosféricas de forma fiável e comparável no tempo;
- Implementação da metodologia nas operações da Sonae Indústria durante um trimestre de 2009.

### 1.4 Contributos do Trabalho

A execução deste projecto beneficiou, qualitativamente, a instituição hospedeira, pois foi sugerida uma metodologia global, coerente e consistente para realizar o inventário de emissões atmosféricas de qualquer unidade da Sonae Indústria. Esta é uma ferramenta de apoio à decisão e de suporte na implementação da política de gestão ambiental da Sonae Indústria.

## 1.5 Organização da Tese

Esta tese de mestrado desenvolvida no âmbito da disciplina de Projecto de Desenvolvimento em Ambiente Empresarial é constituída por 5 capítulos.

No 1º capítulo, Introdução, procede-se ao enquadramento do projecto e à apresentação sucinta do mesmo. Este capítulo também descreve todas as actividades realizadas ao longo do trabalho e expõe os aspectos inovadores do mesmo, assim como os benefícios deste para a empresa.

No 2º capítulo, Estado da Arte, enunciam-se algumas das várias metodologias internacionalmente aceites de quantificação de emissões atmosféricas. Também é realizada uma selecção das metodologias aplicadas por poluente, sendo referidas as razões que sustentaram a escolha ou exclusão das mesmas.

No 3º capítulo, Descrição Técnica e Discussão de resultados, apresentam-se, explicam-se e comparam-se as emissões atmosféricas de cada poluente obtidas pela aplicação das diferentes metodologias. Por fim, sugere-se a metodologia a implementar, bem como outros métodos auxiliares para a sua implementação.

No 4º capítulo, Conclusões, expõem-se os aspectos mais relevantes a concluir após realização deste trabalho.

No 5º capítulo, Avaliação do Trabalho realizado, efectua-se uma apreciação pessoal e global do trabalho realizado.



## 2 Estado da Arte

Actualmente existem várias metodologias mundialmente aceites para quantificar as emissões atmosféricas provenientes de caldeiras e de outros tipos de equipamentos.

A selecção do método a usar depende dos dados exigidos, dos recursos disponíveis e do grau de precisão requerido na estimativa. Geralmente, os dados específicos da unidade fabril em estudo têm preferência relativamente a dados médios referentes a um determinado sector da indústria.

Este capítulo enumera exemplos de metodologias internacionais disponíveis para a estimativa de emissões provenientes de diferentes focos de emissão estacionários e identifica as metodologias de estimativa de emissões mais adequadas para cada tipo de poluente.

### 2.1 Metodologia “balanço material”

Esta metodologia utiliza o consumo de matéria-prima, bem como a fracção de cada poluente na mesma e a quantidade de material reciclado, eliminado e/ou reconvertido para estimar a quantidade de poluente emitida. É normalmente utilizada na estimativa de emissão de partículas, COVs e metais pesados.

O “balanço material” é maioritariamente usado quando uma quantidade constante de material é emitida durante o seu uso e/ou todas as emissões não estão sujeitas a mecanismos de controlo. Contudo, esta metodologia também é aplicável na existência de mecanismos de controlo, se o factor de eficiência relativo a cada tipo de equipamento for conhecido [2].

A emissão de um poluente pode ser determinada pela seguinte equação:

$$E_x = \left[ (Q_{mpe} - Q_{mr} - Q_{mc} - Q_{mps}) \times \bar{C}_{mX} \right] \times (1 - \eta_{controlo}) \quad (2.1)$$

onde:

$E_x$	Emissão horária do poluente X	(kg·h <sup>-1</sup> )
$\bar{C}_{mX}$	Teor mássico médio do poluente X na matéria-prima	(kg kg <sup>-1</sup> )
$Q_{mpe}$	Caudal mássico de matéria-prima à entrada	(kg·h <sup>-1</sup> )
$Q_{mps}$	Caudal mássico de matéria-prima à saída	(kg·h <sup>-1</sup> )
$Q_{mr}$	Caudal mássico de matéria-prima reciclada	(kg·h <sup>-1</sup> )
$Q_{mc}$	Caudal mássico de matéria-prima reconvertida	(kg·h <sup>-1</sup> )
$\eta_{controlo}$	Eficiência de remoção do equipamento de controlo	(%)

Industrialmente, esta metodologia é de execução complexa e apresenta uma limitação relevante. Exige informação, que na maior parte dos sectores industriais não se encontra disponível, nomeadamente o teor de cada poluente emitido com origem nas diferentes matéria-primas usadas. Essa limitação torna impeditivo o seu uso ao nível industrial.

No caso da Sonae Indústria, a obtenção deste tipo de informação resulta na realização dum trabalho experimental elaborado e extenso. A matéria-prima usada, a madeira, provém de diferentes origens, cada uma com a sua composição específica: pinho, eucalipto, madeira reciclada da indústria de painéis de derivados da madeira e de outras indústrias, pó excendentário dos processos de corte e lixagem, entre outros [13].

## 2.2 Metodologia “sistema de monitorização de emissões em contínuo”

O sistema de monitorização de emissões em contínuo (CEMS) permite uma monitorização ininterrupta de emissões por um período extenso de tempo [4]. Este método utiliza diferentes equipamentos que empregam vários princípios de medição directa da concentração dos poluentes nas correntes gasosas. Na medição de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> são usados sensores electroquímicos [19]; na medição de partículas são utilizadas unidades que se regem por princípios ópticos, triboeléctricos e mais recentemente, electrodinâmicos [15]; Para os restantes poluentes, a sua concentração é determinada por medições fotométricas; O CO é determinado de forma indirecta por intermédio de cálculo [20].

Uma vez conhecida a concentração do poluente, o caudal mássico de emissão pode ser obtido multiplicando esta pelo caudal volumétrico de gás emitido.

$$E_x = \frac{C_x \times MM \times Q \times 60}{V \times 10^3} \quad (2.2)$$

onde:

$E_x$	Emissão horária do poluente X	(g·h <sup>-1</sup> )
$C_x$	Concentração do poluente X no gás emitido em base seca	(ppmv <sub>seco</sub> /ml·m <sup>3</sup> )
$Q$	Caudal volumétrico seco emitido	(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )
$V$	Volume ocupado por uma mole de gás ideal nas condições de padrão de temperatura e pressão (CPPT) (a 0 °C e 1 bar)	(l·mol <sup>-1</sup> ) 22,71
60	Conversão de hora para minuto	
10 <sup>3</sup>	Conversão de m <sup>3</sup> para ml	
$MM$	Massa molecular do poluente X	(g·mol <sup>-1</sup> )

A precisão deste método é reduzida para baixas concentração de poluentes, devido ao limite de detecção do equipamento.

## 2.3 Metodologia “amostragem”

A recolha de amostras dos gases de exaustão na chaminé dos focos de emissão fornece informações qualitativas e quantitativas acerca das emissões durante o período de teste. As amostras são recolhidas por intermédio de sondas introduzidas na chaminé, enquanto a concentração dos poluentes é determinada, posteriormente, através de análise laboratorial, de acordo as normas de referência da ISO - *International Organization for Standardization* ou da EPA<sub>US</sub>

Na Tabela 1 estão representadas as normas de referência de medição de diferentes parâmetros, de acordo, a EPA [7] e a ISO [9].

**Tabela 1 - Normas de referência para a determinação dos diferentes parâmetros.**

Parâmetro	Norma de referência acordo	
	EPA <sub>US</sub>	ISO <sup>l</sup>
Teor de Humidade	EPA 4:2000	NP ISO 16985:2003
Velocidade e Caudal	EPA 2:2000	NP ISO 10780:2000
SO <sub>2</sub>	EPA 6:2000	NP ISO 10396:2007
NO <sub>x</sub>	EPA 7:2000	NP ISO 10396:2007
CO	EPA 10:2000	NP ISO 10396:2007
CO <sub>2</sub>	EPA 6A:2000 / 6B:2000	NP ISO 10396:2007
COV <sub>s</sub>	EPA 18:2000 / 25:2000	-
Partículas	EPA 5:2000 / EPA 17:2000	NP ISO 9096:2003
Metais pesados	EPA 29:2000	-

Alguns métodos de amostragens fornecem informação em tempo real, na qual a amostra de gás é analisada *on-site* por análise contínua [2].

A concentração de poluentes é obtida dividindo a quantidade de poluente pelo volume da amostra. O caudal mássico de emissão de poluente é determinado multiplicando a concentração de poluente pelo caudal volumétrico da corrente gasosa.

$$E_x = \frac{m_x}{V_m} \times Q \times 60 \quad (2.3)$$

onde:

$E_x$	Emissão horária do poluente X	(g·h <sup>-1</sup> )
$m_x$	Massa do poluente X no filtro	(g)
$Q$	Caudal volumétrico de gás seco recolhido	(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )
$V_m$	Volume da amostra de gás seco	(m <sup>3</sup> )
60	Conversão de hora para minuto	

O método de amostragem deve ser realizado somente por pessoal especializado e com experiência. A precisão deste método é reduzida para baixa concentração de poluentes [4].

## 2.4 Metodologia “análise de combustível”

Dados relativos ao combustível, nomeadamente, o seu consumo e composição, podem ser usados para prever as emissões atmosféricas aplicando leis de conservação de massa.

Por exemplo, se a concentração de poluente no combustível e o consumo deste último forem conhecidos, a emissão desse poluente pode ser determinada tendo em conta os factores associados à oxidação dos elementos constituintes do combustível, carbono (C) e enxofre (S) e ao equipamento de controlo, no caso deste existir [4].

Os valores referentes aos factores de oxidação do carbono (C) para os diferentes tipos de combustível estão representados na Tabela 2 [21].

*Tabela 2 - Valores convencionais e gama de valores de factores de oxidação do carbono para os diferentes tipos de combustível.*

Tipo de combustível	Valor convencional de factor de oxidação / %	Gama de valores de factor de oxidação / %
Carvão	98	91 - 100
Petróleo e derivados	99	97,5 - 100
Gás natural	99,5	99 - 100

A equação base para o cálculo das emissões usando a metodologia “análise de combustível” é:

$$E_x = Q_c \times \frac{\%(m/m)}{100} \times \frac{MM_x}{MM_c} \times f.o \quad (2.4)$$

onde:

$E_x$	Emissão do poluente X	(kg·h <sup>-1</sup> )
%( <i>m / m</i> )	Teor mássico do poluente X no combustível	(%)
$Q_c$	Caudal mássico de combustível	(kg·h <sup>-1</sup> )
$MM_x$	Massa molecular do poluente emitido; por exemplo: CO <sub>2</sub>	(g·mol <sup>-1</sup> )
$MM_c$	Massa molecular do poluente no combustível; por exemplo: C	(g·mol <sup>-1</sup> )
$f.o$	Factor de oxidação	(kg·kg <sup>-1</sup> )

Nesta metodologia, a estimativa de emissões atmosféricas é realizada por excesso. Esta quantifica uma pequena quantidade de poluentes que não são emitidos para a atmosfera por se encontrarem em estados físico-químicos que impossibilitam tal acção (cinzas, hidrocarbonetos não-queimados, etc) [4].

## 2.5 Metodologia “factores de emissão”

Devido á sua disponibilidade e aceitação na Indústria, os factores de emissão são usualmente utilizados na preparação do inventário de emissões [17].

A determinação dos factores de emissão é baseada em testes de emissão realizados em unidades fabris funcionalmente similares. Contudo, o seu utilizador deve reconhecer que, na maior parte dos casos, os factores de emissão são resultantes de médias duma imensidão de dados industriais com diferentes graus de qualidade. Consequentemente, os factores de emissão não podem ser representativos duma unidade fabril individual do mesmo sector industrial.

A EPA possui uma compilação de factores de emissão para os diferentes tipos de indústrias, processos, equipamentos e combustíveis responsáveis por emissões de diversos poluentes [5]. Os factores de emissões são apresentados em massa de poluente por quantidade do combustível consumido em unidades de massa, volume ou energia; ou por tonelada de madeira seca à saída do secador; ou por metros cúbicos de painéis produzidos à saída da prensa.

A equação base para calcular as emissões usando os factores de emissão é:

$$E_x = FE_x \times Q_{combustível} \quad (2.5)$$

onde:

$E_x$	Emissão horária do poluente X	(kg·h <sup>-1</sup> )
$FE_x$	Factor de emissão de X	(kg·kg <sup>-1</sup> <sub>combustível</sub> ou kg·m <sup>-3</sup> <sub>combustível</sub> ou kg·GJ <sup>-1</sup> <sub>combustível</sub> )
$Q_c$	Caudal mássico ou volúmico ou energético de combustível	(kg·h <sup>-1</sup> ou m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ou GJ·h <sup>-1</sup> )

## 2.6 Metodologia “sistema preditivo de monitorização de emissões”

O sistema preditivo de monitorização de emissões (*PEMS*) consiste no desenvolvimento de regressões entre as emissões (caudal mássico/concentração) dos poluentes e outros parâmetros medidos directamente ao longo do processo [2].

Sob o ponto de vista dos processos de combustão, secagem e prensagem destacam-se os seguintes parâmetros: a pressão e temperatura de exaustão da chaminé, a humidade absoluta, o teor de  $O_2$ , a velocidade de escoamento e o caudal volumétrico em base seca.

No desenvolvimento das correlações, admitindo que ‘x’ e ‘y’ são as variáveis independentes e dependentes, respectivamente, existem certos pressupostos a considerar [8]:

- O valor médio dos erros dos valores de ‘x’ e ‘y’ é igual a zero;
- Os erros dos valores de ‘x’ e ‘y’ têm uma variância comum;
- Os erros dos valores de ‘x’ e ‘y’ são independentes;
- Os valores de ‘y’ para cada ‘x’ têm uma distribuição normal;
- Os valores de ‘x’ têm um erro desprezável em relação aos de ‘y’ ( $\approx 10$  menor).

Esta metodologia exige a recolha periódica de amostras para verificar a validade das correlações [2].

## 2.7 Metodologias preferenciais e alternativas de estimativa de emissões atmosféricas

De acordo com a literatura, as metodologias de quantificação de emissões atmosféricas enunciadas nas secções anteriores deste capítulo dividem-se em 2 grupos: as preferenciais e alternativas.

A Tabela 3 expressa quais as metodologias preferenciais e alternativas para estimar as emissões de cada poluente [2].

*Tabela 3 - Métodologias preferenciais e alternativos para a estimativa de emissões de cada poluente.*

Poluentes	Metodologias preferenciais de estimativa de Emissões	Metodologias alternativas de estimativa de emissões
SO <sub>2</sub>	<i>CEMS/PEMS</i>	1. análise de combustível 2. amostragem 3. factores de emissão
NO <sub>x</sub>	<i>CEMS/ PEMS</i>	1. amostragem 2. factores de emissão
CO	<i>CEMS/PEMS</i>	1. amostragem 2. factores de emissão
CO <sub>2</sub>	<i>CEMS/PEMS</i>	1. amostragem 2. análise de combustível 3. factores de emissão
COVs	amostragem	1. <i>PEMS</i> 2. factores de emissão 3. balanço material
Partículas	amostragem	1. <i>PEMS</i> 2. factores de emissão 3. balanço material
Metais pesados	análise de combustível	1. amostragem 2. factores de emissão 3. balanço material

De acordo com a literatura, as metodologias preferenciais de estimativa de emissões atmosféricas utilizam meios directos e indirectos de quantificação. As metodologias preferenciais de medição indirecta incluem a “amostragem” e o “PEMS”. O primeiro, por sua vez, recorre a procedimentos padrão de recolha de amostras da EPA ou outros procedimentos de qualidade conhecida (por exemplo normas ISO). Por outro lado, a metodologia preferencial de medição directa restringe-se à metodologia “CEMS” [4].

A selecção da metodologia preferencial é realizada, de acordo com a especificidade do tempo de estimativa de emissões e a qualidade dos dados. Por sua vez, a qualidade dos dados depende de vários factores, incluindo o número de amostras e a operação e manutenção do equipamento que está a ser usado na realização das medições.

Na generalidade, para curtos períodos de tempo (semana, mês) a metodologia “amostragem” fornece dados precisos para qualquer momento. Contudo para elevados períodos de tempo (ano), a metodologia “CEMS” é a mais aconselhável pois efectua medidas directas durante o período de interesse.

O “CEMS” é a metodologia preferencial para estimar as emissões de gases de exaustão secos. Ou seja, na quantificação das emissões atmosféricas provenientes de processos de combustão ( $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_x$ ), o “CEMS” é a metodologia mais adequada. Outras metodologias alternativas para estimar as emissões destes poluentes são: a “amostragem” e “factores de emissão”.

A estimativa de emissões de partículas e COVs é preferencialmente realizada pela metodologia “amostragem”. Outras metodologias interessantes a considerar são: “PEMS”, “factores de emissão” e “balanço material”.

A metodologia “análise de combustível” é a preferida para estimar as emissões de metais pesados, quando o equipamento de controlo de poluição não estiver instalado. Contudo, este pode ser aplicado na existência de equipamentos de controlo se as eficiências de colecção específicas e a quantidade deste poluente presente nas cinzas forem conhecidas.



## 2.8 Selecção de Metodologias

Na secção anterior foram mencionadas as metodologias preferenciais e alternativas referidas na literatura para estimar as emissões atmosféricas por poluente. Contudo, nem todas podem ser aplicadas às operações das unidades fabris da Sonae Indústria, durante a realização deste projecto. Portanto, procedeu-se à sua selecção.

As metodologias seleccionadas por poluente estão referidas na Tabela 4.

*Tabela 4 - Metodologias aplicadas na quantificação das emissões atmosféricas para cada tipo de poluente.*

Poluentes	Metodologias Aplicadas
SO <sub>2</sub>	PEMS factores de emissão análise de combustível
NO <sub>x</sub>	PEMS factores de emissão
CO	PEMS factores de emissão
CO <sub>2</sub>	PEMS factores de emissão análise de combustível
COVs	PEMS factores de emissão
Partículas	PEMS factores de emissão
Metais pesados	PEMS factores de emissão

Na generalidade dos poluentes, das seis metodologias existentes, somente três delas foram aplicadas: “PEMS”, “factores de emissão” e “análise de combustível”.

O “CEMS” não foi aplicado devido a limitações tecnológicas. A tecnologia existente de monitorização contínua de emissões de partículas não possui a capacidade de realizar medições fiáveis e reprodutíveis ao longo do tempo em emissões com humidade elevada. Este facto, além de ser referido na literatura, foi comprovado durante uma reunião com os colaboradores da TECNILAB, empresa que comercializa equipamentos de emissões atmosféricas [15].

Por exemplo, nas unidades fabris da Sonae Indústria, os principais focos de emissões atmosféricas de partículas são as chaminés dos secadores cujos gases de exaustão apresentam valores de humidade absoluta até 50 %. Estes focos de emissão também são constituídos pelos gases quentes provenientes dos processos de combustão, que são usados na secagem.

A exclusão da aplicação da metodologia “amostragem” justifica-se pela necessidade de recolha de amostras em curtos períodos de tempo, o que implicaria a mobilização de elevados recursos financeiros e de pessoal especializado.

Por outro lado, o factor tempo foi a razão explicativa pela exclusão da metodologia “balanço material”. Devido à informação que esta metodologia exige, teria de ser realizado um trabalho laboratorial extenso para determinar o teor de cada poluente nas diferentes matérias-primas utilizadas.

Sob ponto de vista da estimativa de emissões de metais pesados, a aplicação da metodologia “análise de combustível” não foi realizada por carência de informação. O teor de As, Cd, Zn, Pb, Cu, Cr, Hg e Ni nos combustíveis não estavam referidos nas folhas de especificação disponibilizadas pelo fornecedor.

### 3 Descrição Técnica e Discussão dos Resultados

Como concluído no capítulo anterior, das seis metodologias apresentadas, somente três foram aplicadas com o objectivo de quantificar as emissões atmosféricas das unidades fabris de Oliveira do Hospital e de Mangualde da Sonae Indústria. Essas metodologias foram “factores de emissão”, “PEMS” e “análise de combustível”.

Neste capítulo, irão ser apresentados, discutidos e comparados criticamente os resultados obtidos pela aplicação de cada uma destas metodologias.

#### 3.1 Metodologia “factores de emissão”

Na aplicação desta metodologia foi desenvolvida uma ferramenta de cálculo em formato *MSEXcel* para as unidades fabris de Oliveira do Hospital e de Mangualde, com base numa folha análoga do *WBCSD*, que se destinava à estimativa da emissão global de CO<sub>2</sub>. A ferramenta desenvolvida foi reestruturada e adaptada para estimar as emissões locais (caldeira, secador, prensa e cogeração) e globais de todos os poluentes. Esta ferramenta é abrangente e aplicável a qualquer unidade fabril da Sonae Indústria.

As folhas de cálculo denominadas por *Metodologia “factores de emissão”\_OH.xls* e por *Metodologia “factores de emissão”\_MNG.xls* relativamente à unidade fabril de Oliveira do Hospital e de Mangualde, respectivamente, podem ser consultadas no *CD-ROM: “Quantificação de Emissões Atmosféricas na Indústria de Painéis de Derivados da Madeira”*, em anexo.

### 3.1.1 Emissões Globais

Nesta secção foram apresentadas e discutidas, as emissões de CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COVs, partículas e metais pesados relativamente ao ano de 2008 para as unidades fabris de Oliveira do Hospital e de Mangualde. As emissões destes poluentes estão referidas na Tabela 5.

*Tabela 5 - Emissões globais do ano de 2008, em toneladas, por poluente, para as unidades fabris de Oliveira do Hospital e de Mangualde obtidas pela aplicação da Metodologia “factores de emissão”.*

Poluente		Emissões anuais de Oliveira do Hospital / toneladas	Emissões anuais de Mangualde / toneladas
CO <sub>2</sub>	Combustíveis fósseis	37457	35067
	Combustíveis fósseis + Biomassa	71066	70440
CO		132	135
SO <sub>2</sub>		125	83
NO <sub>x</sub>		758	703
Partículas		41	1189
COVs		179	789
Arsénio		3,2 x 10 <sup>-3</sup>	3,3 x 10 <sup>-3</sup>
Cádmio		5,9 x 10 <sup>-4</sup>	6,7 x 10 <sup>-4</sup>
Crómio		3,0 x 10 <sup>-3</sup>	3,2 x 10 <sup>-3</sup>
Cobre		7,1 x 10 <sup>-3</sup>	7,5 x 10 <sup>-3</sup>
Mercúrio		5,1 x 10 <sup>-4</sup>	5,4 x 10 <sup>-4</sup>
Níquel		4,8 x 10 <sup>-3</sup>	5,1 x 10 <sup>-3</sup>
Chumbo		6,9 x 10 <sup>-3</sup>	7,3 x 10 <sup>-3</sup>
Zinco		6,0 x 10 <sup>-2</sup>	6,5 x 10 <sup>-2</sup>

Sob ponto de vista geral, verificou-se que as unidades de produção de painéis de derivados da madeira emitem, principalmente, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, partículas e COVs. As emissões anuais de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, partículas e COVs estimadas pela metodologia “factores de emissão” para o ano de 2008 foram: 71066 e 70440, 758 e 703, 41 e 1089 e 179 e 789 toneladas, para as unidades de Oliveira do Hospital e de Mangualde, respectivamente.

Comparativamente, em termos de grandeza, concluiu-se que as emissões dos vários poluentes nas duas unidades fabris são concordantes, à excepção das partículas e COVs. Essa concordância explica-se pela semelhança nos valores de potência instalada, capacidade de produção e consumo de matéria-prima em ambas unidades fabris. Por outro lado, a diferença de duas ordens de grandeza nas emissões de partículas e de uma ordem de grandeza nas emissões de COVs justifica-se pela existência de equipamentos de controlo de emissões mais eficientes na unidade de Oliveira do Hospital, nomeadamente, o precipitador electrostático húmido (*WESP - Wet ElectroStatic Precipitator*) e filtros húmidos (*hydroscreen filter*) cujas eficiências de remoção de partículas são 93,0 % e 84,5 %, respectivamente. O precipitador electrostático húmido, apesar de não ter sido projectado com objectivo de remover COVs apresenta uma eficiência de remoção compreendida entre 23 % a 50 % (segundo informações do fabricante).

Além destes poluentes, as unidades da Sonae Indústria também são responsáveis pela emissão de CO e SO<sub>2</sub> em quantidades relevantes, provenientes das diferentes instalações de combustão: caldeiras, motor de cogeração e queimadores de gás natural. Estes últimos existem, apenas, na unidade de Mangualde.

Relativamente, às emissões de metais pesados constatou-se que estas são insignificantes.

Atendendo à Tabela 5, constatou-se a acção responsável da Sonae Indústria relativamente às interacções das suas unidades fabris com o meio ambiente. Cerca de 50 % das emissões de CO<sub>2</sub> provêm da combustão de fonte de energia alternativa, nomeadamente a biomassa. Estes valores justificam-se pelo uso de caldeiras que utilizam a biomassa como fonte de energia primária, exceptuando o combustível fóssil (fuelóleo e/ou diesel) necessário para arranque. Por outro lado, a maioria das emissões de CO<sub>2</sub> provenientes de combustível fóssil originam-se nas unidades de cogeração que são alimentadas unicamente por combustível residual, nomeadamente, o fuelóleo nº4.

### 3.1.2 Emissões Locais

Nas unidades da Sonae Indústria, a produção de painéis de derivados da madeira envolve várias etapas que geram emissões: a cogeração [16], a geração de gases quentes, a secagem, a prensagem e o arrefecimento dos painéis. A cada etapa processual associa-se a emissão de determinados tipos de poluentes, a qual se denominou por emissão local.

Os diagramas processuais da produção do aglomerado de partículas (PB) na unidade fabril de Oliveira do Hospital e do aglomerado de fibras de média densidade (MDF) na unidade fabril de Mangualde podem ser consultados nos Anexos I e II, respectivamente.

Os valores das emissões anuais locais dos vários poluentes previstos pela metodologia “factores de emissão” estão apresentados na Tabela 6 e 7, para as unidades de Oliveira do Hospital e de Mangualde respectivamente.

*Tabela 6 - Emissões locais do ano de 2008, em toneladas, por poluente, da unidade fabril de Oliveira do Hospital previstas pela metodologia “factores de emissão”.*

Poluente	Emissão anuais locais de Oliveira do Hospital / toneladas				
	Cogeração	Geração de Gases Quentes	Secagem	Prensagem	Arrefecimento dos painéis
CO <sub>2</sub>	31491	39575	-	-	-
CO	44	88	-	-	-
SO <sub>2</sub>	87	38	-	-	-
NO <sub>x</sub>	721	37	-	-	-
Partículas	2,0	6,7	28	2,9	1,5
COVs	27	2,1	70	74	6,1
Arsénio	$2,7 \times 10^{-7}$	$3,2 \times 10^{-3}$	-	-	-
Cádmio	$2,0 \times 10^{-7}$	$5,9 \times 10^{-4}$	-	-	-
Crómio	$2,0 \times 10^{-7}$	$3,0 \times 10^{-3}$	-	-	-
Cobre	$4,1 \times 10^{-7}$	$7,1 \times 10^{-3}$	-	-	-
Mercúrio	$2,0 \times 10^{-7}$	$5,1 \times 10^{-4}$	-	-	-
Níquel	$6,9 \times 10^{-7}$	$4,8 \times 10^{-3}$	-	-	-
Chumbo	$6,1 \times 10^{-7}$	$6,9 \times 10^{-3}$	-	-	-
Zinco	$4,3 \times 10^{-7}$	$6,0 \times 10^{-2}$	-	-	-

**Tabela 7 - Emissões locais do ano de 2008, em toneladas, por poluente, da unidade fabril de Mangualde previstas pela metodologia de “factores de emissão”.**

Poluente	Emissão anuais locais de Mangualde / toneladas				
	Cogeração	Geração de Gases Quentes	Secagem	Prensagem	Arrefecimento dos painéis
CO <sub>2</sub>	28917	41523	-	-	-
CO	40	95	-	-	-
SO <sub>2</sub>	79	3,8	-	-	-
NO <sub>x</sub>	665	38	-	-	-
Partículas	22	81	1058	24	3,5
COVs	33	2,8	690	55	8,9
Arsénio	$7,1 \times 10^{-9}$	$3,3 \times 10^{-3}$	-	-	-
Cádmio	$2,1 \times 10^{-9}$	$6,2 \times 10^{-4}$	-	-	-
Crómio	$4,5 \times 10^{-9}$	$3,1 \times 10^{-3}$	-	-	-
Cobre	$9,5 \times 10^{-9}$	$7,4 \times 10^{-3}$	-	-	-
Mercúrio	$6,1 \times 10^{-10}$	$5,3 \times 10^{-4}$	-	-	-
Níquel	$4,5 \times 10^{-7}$	$5,1 \times 10^{-3}$	-	-	-
Chumbo	$8,1 \times 10^{-9}$	$7,3 \times 10^{-3}$	-	-	-
Zinco	$1,6 \times 10^{-7}$	$6,4 \times 10^{-2}$	-	-	-

De acordo com as Tabelas 6 e 7, nas unidades fabris de Oliveira do Hospital e de Mangualde, 57 % das emissões de CO<sub>2</sub> originam-se em instalações de geração de gases quentes (caldeiras e queimadores de gás) usados na secagem da madeira e no aquecimento do termofluido das prensas. As restantes emissões provêm da combustão nos motores de cogeração *Wartsila*.

Em ambas as unidades fabris cerca de 95 % das emissões de NO<sub>x</sub> formam-se na instalação de cogeração.

As emissões de SO<sub>2</sub> também têm origem, essencialmente no processo de combustão do motor de cogeração (70 % e 95 % para as unidades de Oliveira do Hospital e de Mangualde, respectivamente). Contudo, esta última percentagem foi calculada por excesso pois o consumo de fuelóleo e/ou gasóleo para o arranque das caldeiras em Mangualde não foi contabilizado.

A maioria das emissões de partículas e de COVs formam-se maioritariamente em processos de secagem e prensagem (80 % para Oliveira do Hospital e 90 % para Mangualde).

### 3.1.3 Estudo dos resultados obtidos após aplicação da Metodologia “factores de emissão”

Com o objectivo de validar as emissões dos diferentes poluentes obtidas pela aplicação da metodologia “factores de emissão”, estabeleceu-se uma comparação, por poluente, entre as duas medições anuais realizadas *in loco*, impostas pela legislação portuguesa, com as emissões mensais globais previstas pelos factores de emissão existentes na literatura [5]. No ano de 2008, as medições *in loco* foram realizadas nos meses de Outubro e Dezembro em Mangualde e nos meses de Julho e Novembro em Oliveira do Hospital.

As emissões de metais pesados foram excluídas deste estudo porque a sua medição *in loco* não é realizada em Mangualde. Por outro lado, a ausência deste dados não é crítica pois, de acordo a secção 3.1.1, as emissões deste poluente são insignificantes.

Admitindo que as emissões (concentração e caudal mássico) dos diversos poluentes obtidas *in loco* são constantes ao longo de todo o mês, obteve-se os seguintes resultados, representados na Tabela 8.

**Tabela 8** - Comparação, por poluente, entre as emissões mensais globais experimentais e as obtidas pela aplicação da metodologia “factores de emissão”, em toneladas.

Poluente	Emissões mensais globais / toneladas							
	Oliveira do Hospital				Mangualde			
	Experimental		“factores de emissão”		Experimental		“factores de emissão”	
	07/2008	11/2008	07/2008	11/2008	10/2008	12/2008	10/2008	12/2008
CO <sub>2</sub>	-	-	-		13500	12594	5059	6733
CO	6	3	11	13	14	44	8	13
SO <sub>2</sub>	5	1	13	8	11	5	10	10
NO <sub>x</sub>	22	22	55	72	104	75	83	87
Partículas	3	2	2	3	8	7	108	54
COVs	4	4	11	12	2	2	61	32



Atendendo à Tabela 8, averiguou-se que, exceptuando certos casos isolados (por exemplo: a emissão de partículas em Oliveira do Hospital), a maioria das emissões mensais dos diferentes poluentes previstas pela aplicação da metodologia “factores de emissão” apresentam desvios relativamente aos dados experimentais. Esta discrepância pode ser justificada pela inadequação dos factores de emissão utilizados e/ou incerteza na fiabilidade das medições *in loco* realizadas no ano de 2008.

De acordo informações internas, as medições *in loco* realizadas em ambas as unidades por uma empresa subcontratada no período de 2006 a 2008 são pouco fiáveis e inexplicáveis. A baixa fiabilidade das suas medições *in loco* evidencia-se nas variações entre estas medições e outras realizadas por empresas distintas em anos anteriores. As variações das medições são inexplicáveis pois quer o processo quer os equipamentos não sofreram qualquer alteração nos últimos anos.

### 3.2 Metodologia “análise de combustível”

A aplicação deste método envolveu o desenvolvimento duma ferramenta de cálculo em formato *MSExcels* para as unidades fabris de Oliveira do Hospital e de Mangualde. A estrutura e funcionalidade desta é semelhante à folha de cálculo desenvolvida para a metodologia “factores de emissão” mas apresenta duas diferenças fulcrais: os dados exigidos na sua aplicação e a índole do poluente em estudo. Esta metodologia requer dados relativos ao consumo e composição do combustível em vez dos factores de emissão; e é aplicada, somente na estimativa de emissões locais e globais de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e metais pesados.

As folhas de cálculo denominadas por Metodologia “análise de combustível”\_OH.xls e por Metodologia “análise de combustível”\_MNG.xls relativas à unidade fabril de Oliveira do Hospital e de Mangualde, respectivamente, podem ser consultadas no CD-ROM, “Quantificação de Emissões Atmosféricas Na Indústria de Painéis de Derivados da Madeira”, em anexo.

Devido à carência de informação, nomeadamente a composição dos diversos metais pesados nos vários combustíveis, a quantificação das emissões de metais pesados não foi realizada.

### 3.2.1 Emissões globais

As emissões globais de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> obtidas pela aplicação da metodologia “análise de combustível” para a unidade de Oliveira do Hospital e de Mangualde estão expressas na Tabela 9.

*Tabela 9 - Emissões globais do ano de 2008, por poluente, em toneladas, obtidas pela aplicação da metodologia “análise de combustível” para unidades fabris de Oliveira do Hospital e de Mangualde.*

Poluente		Emissões anuais de Oliveira do Hospital / toneladas	Emissões anuais de Mangualde / toneladas
CO <sub>2</sub>	Combustíveis fósseis	22753	18416
	Combustíveis fósseis + Biomassa	71379	69593
SO <sub>2</sub>		126	86

As emissões anuais de 2008 de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> nas unidades de Oliveira do Hospital e de Mangualde são 71379, 126 toneladas e 69593, 86 toneladas, respectivamente. Para ambas as unidades, cujas potência instalada, consumo de matéria-prima e capacidade de produção são idênticas, constatou-se que as suas emissões de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> também eram similares.

Nas unidades de Oliveira do Hospital e de Mangualde cerca de 70% das emissões de CO<sub>2</sub> provêm da combustão da biomassa.

### 3.2.2 Emissões locais

As emissões locais de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> obtidas após aplicação da metodologia “análise de combustível” para a unidade de Oliveira do Hospital e de Mangualde estão expressas na Tabela 10.

*Tabela 10 - Emissões locais do ano de 2008, por poluente, em toneladas, obtidas pela aplicação da metodologia “análise de combustível” para unidades fabris de Oliveira do Hospital e de Mangualde.*

Emissões anuais locais / toneladas				
Poluente	Oliveira do Hospital		Mangualde	
	Cogeração	Geração de Gases Quentes	Cogeração	Geração de Gases Quentes
CO <sub>2</sub>	16587	54792	12645	56948
SO <sub>2</sub>	91	35	80	6

De acordo com a Tabela 10, nas unidades de Oliveira do Hospital e de Mangualde, cerca de 80 % das emissões de CO<sub>2</sub> são originadas nos processos de combustão das caldeiras e dos queimadores de gás natural.

Por outro lado, nas unidades de Oliveira do Hospital e de Mangualde cerca de 72 e 93 % das emissões de SO<sub>2</sub> são produzidas durante a cogeração. Contudo, esta última percentagem é quantificada por excesso pois o consumo de fuelóleo e/ou gasóleo para o arranque das caldeiras em Mangualde não foi contabilizado.

### 3.2.3 Análise comparativa entre as metodologias “factores de emissão” e “análise de combustível”

Após aplicação das metodologias “factores de emissão” e “análise de combustível” reconheceu-se uma similitude entre as emissões globais de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> previstas por ambos. Esses valores estão apresentados na Tabela 11.

*Tabela 11 - Paralelismo entre as metodologias “factores de emissão” e “análise de combustível”.*

Poluente	Emissões anuais de Oliveira do Hospital / toneladas		Emissões anuais de Mangualde / toneladas	
	“factores de emissão”	“análise de combustível”	“factores de emissão”	“análise de combustível”
CO <sub>2</sub>	71066	71379	70440	69563
SO <sub>2</sub>	125	126	83	86

Atendendo à Tabela 11, constatou-se que as emissões previstas por ambos os métodos são coerentes, uma vez que os erros relativos dos seus valores são da ordem de 1 %. Esta proximidade pode ser explicada pelo facto de ambas as metodologias recorrerem a princípios idênticos na estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>. Para processos de combustão, os factores de emissão são calculados com base na composição média dos combustíveis. Portanto, as reduzidas diferenças entre as emissões estimadas por ambos os métodos podem ser atribuídas a arredondamentos.

### 3.3 Metodologia “sistema preditivo de monitorização de emissões”

A aplicabilidade desta metodologia consistiu no desenvolvimento de regressões entre o caudal ( $Q_m$ ) /concentração ( $C_m$ ) mássicos dos diferentes poluentes e outras variáveis do processo medidas directamente para todas as fontes de emissão estacionárias de ambas unidades fabris. Os dados experimentais relativos aos poluentes provêm dos relatórios de efluentes gasosos das unidades de Oliveira do Hospital e de Mangualde realizados duas vezes por ano durante o período de 2006 a 2008; e os parâmetros de processo utilizados foram: a temperatura ( $T$ ), a pressão absoluta ( $P$ ), a humidade absoluta ( $H$ ), o teor de  $O_2$  ( $\%O_2$ ), a velocidade ( $v$ ) e o caudal seco ( $Q_s$ ) em condições normais de pressão e temperatura ( $PTN$ ).

Assumiu-se que os dados experimentais eram fiáveis, dado que de outra forma não seria possível a aplicação desta metodologia.

Tendo em atenção à incerteza associada às medições experimentais das emissões e ao tempo disponível para a realização do trabalho, decidiu-se pelo estabelecimento de regressões lineares e uni-variável do tipo:  $y = a \times x + b$ , entre os seis pontos experimentais e as diversas variáveis de processo.

Para avaliar a adequação das correlações recorreu-se ao coeficiente de variância (CV) respectivo. Este parâmetro estatístico estima a dispersão dos resultados previstos pela regressão face aos dados experimentais e foi determinado pelas seguintes equações (Esquivel e Vasconcelos 2002):

$$CV(\%) = \frac{S_{yx}}{\bar{y}} \times 100 \quad (3.3.1)$$

$$S_{yx}^2 = \frac{\sum (y_i - y_{cal})^2}{n - 2} \quad (3.3.2)$$

onde:

$CV$	Coeficiente de Variância	(%)
$\bar{y}$	Valor médio dos pontos experimentais	
$S_{yx}^2$	Variância da regressão linear	
$y_i$	Valor da medição experimental	
$y_{cal}$	Valor da medição previsto pela regressão linear	
$n$	Número de pontos experimentais	

### 3.3.1 Mangualde

A unidade de Mangualde é constituída por duas linhas de produção de aglomerado de fibras de média densidade (MDF) e apresenta quinze fontes de emissão estacionárias: as chaminés das caldeiras da 1ª e 2ª linhas de produção, a chaminé do motor de cogeração *Wartsila*, as chaminés dos 1º e 2º estágios do secador da 1ª linha de produção, as chaminés dos dois secadores *sifter norte* e *sifter sul* da 2ª linha de produção, as seis chaminés da prensa semi-contínua da 1ª linha de produção e as duas chaminés da prensa contínua da 2ª linha de produção.

Para a aplicação desta metodologia à unidade fabril de Mangualde, dividiu-se os diferentes focos de emissão estacionários em três grupos, de acordo a natureza do processo envolvente: unidades de combustão, secagem e prensagem. Os focos de emissão estacionários dos processos de secagem e combustão em Mangualde podem ser visualizados na Figura 1.

#### 3.3.1.1 Unidades de combustão

Na unidade fabril de Mangualde, as instalações de combustão incluem o motor de cogeração *Wartsila* de 6 MW e as duas caldeiras ITI da 1ª e 2ª linhas de produção cuja capacidade instalada é 26,6 e 24,4 MW, respectivamente.

As regressões lineares relativas ao motor de cogeração *Wartsila* (MC) e às caldeiras da 1ª (C1) e 2ª linhas de produção (C2) podem ser consultadas na Tabela 17 do Anexo VII.

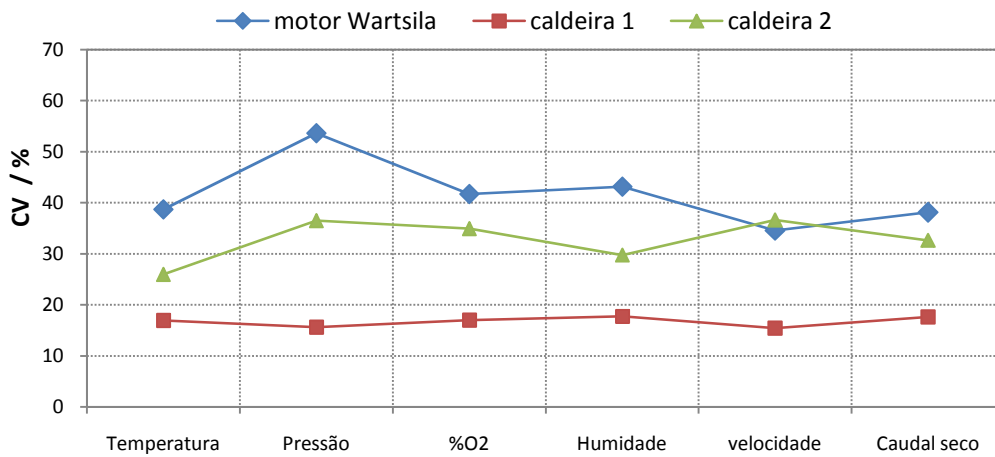
Posteriormente, para cada uma das regressões expressas na Tabela 17 foi determinado o coeficiente de variância pelas equações 3.3.1 e 3.3.2. Estes foram analisados, por poluente, para os três equipamentos de combustão, com o objectivo de determinar qual o parâmetro de operação mais adequado para prever o caudal/concentração mássicos dum determinado poluente. Esta análise para as partículas pode ser consultada nas Figuras 2 e 3. A análise análoga realizada para os outros poluentes pode ser conferida nas Figuras 7 a 11 no Anexo III.



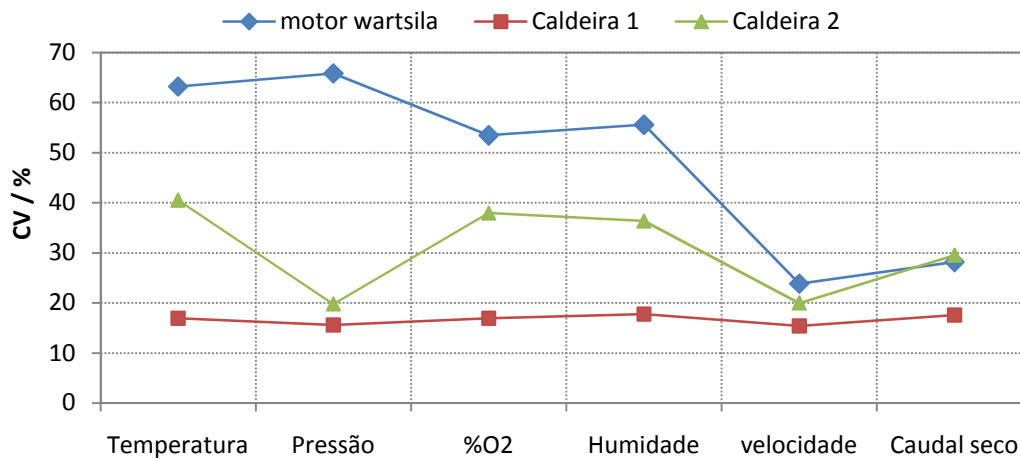


Figura 1 - Focos de emissão estacionários dos processos de combustão e secagem em Mangualde.

- |     |   |     |   |
|-----|---|-----|---|
| (1) | Caldeira da 1ª linha de produção de MDF (C1)                | (5) | Secador <i>sifter</i> norte da 2ª linha de produção de MDF (S2SN) |
| (2) | Caldeira da 2ª linha de produção de MDF (C2)                | (6) | Secador <i>sifter</i> sul da 2ª linha de produção de MDF (S2SS)   |
| (3) | Motor de cogeração Wartsila (MC)                            | (7) | 2º Estágio do secador da 1ª linha de produção de MDF (S1E2)       |
| (4) | 1º Estágio do secador da 1ª linha de produção de MDF (S1E1) |     |   |



**Figura 2** - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração de partículas para as diferentes instalações de combustão de Mangualde.



**Figura 3** - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes ao caudal mássico de partículas para as diferentes instalações de combustão de Mangualde

Na selecção do parâmetro mais adequado para prever a concentração/caudal mássicos de cada poluente, o critério usado foi o de menor coeficiente de variância médio relativo às três unidades de combustão em estudo. Atendendo ao critério referido, construiu-se a Tabela 12 que evidencia o parâmetro mais apropriado para prever a concentração/caudal mássicos de um determinado poluente para as instalações de combustão da unidade fabril de Mangualde.

**Tabela 12 - Parâmetro de operação seleccionado para prever a concentração e o caudal mássico de um determinado poluente e respectivo coeficiente de variância médio para as instalações de combustão de Mangualde.**

	Poluente	Parâmetro	CV <sub>médio</sub> / %
MP	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Temperatura / °C	27,0
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	Velocidade / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	19,7
CO	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Humidade <sub>absoluta</sub> / %	53,2
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{hr}^{-1}$	Teor de O <sub>2</sub> / %	52,6
SO <sub>2</sub>	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Pressão <sub>absoluta</sub> / kPa	38,7
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	Pressão <sub>absoluta</sub> / kPa	52,8
NO <sub>x</sub>	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Teor de O <sub>2</sub> / %	26,4
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	Temperatura / °C	39,5
COVs	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Humidade <sub>absoluta</sub> / %	12,9
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	Caudal <sub>seco</sub> / $\text{Nm}^3\cdot\text{hr}^{-1}$	8,1
CO <sub>2</sub>	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Teor de O <sub>2</sub> / %	17,2
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	Caudal <sub>seco</sub> / $\text{Nm}^3\cdot\text{hr}^{-1}$	23,3

Atendendo à Tabela 12, constatou-se que os parâmetros mais adequados para prever a concentração de CO e COVs, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, partículas e SO<sub>2</sub> são a humidade absoluta, o teor de O<sub>2</sub>, a temperatura e a pressão absoluta, respectivamente.

Sob ponto de vista de previsão do caudal mássico de COVs e CO<sub>2</sub>, partículas, CO, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, os parâmetros mais apropriados são o caudal seco em condições PTN, a velocidade, o teor de O<sub>2</sub>, a pressão absoluta e a temperatura, respectivamente.

Apesar dos parâmetros referidos serem os mais apropriados, há que enfatizar as limitações das regressões obtidas. Excluindo os parâmetros de previsão da concentração e do caudal mássico dos COVs, todos os outros apresentam coeficientes de variância médios significativos, acima de 15 %.

Por exemplo, o CV<sub>médio</sub> relativo à concentração de NO<sub>x</sub> é da ordem dos 40 %, isto é, se o valor obtido através da correlação for 1000 mg Nm<sup>-3</sup>, o valor real é 1000 ± 400 mg Nm<sup>-3</sup>, havendo assim, o risco de exceder valor limite de emissão legal de NO<sub>x</sub>, 1350 mg Nm<sup>-3</sup>.



### 3.3.1.2 Unidades de secagem

Na unidade de Mangualde, os equipamentos responsáveis pela secagem são os secadores tubulares (*tube blow line dryers*). O secador da 1ª linha de produção de aglomerado de fibras de média densidade é constituído por dois estágios. A cada um deles está associado um foco de emissão. Por outro lado, a 2ª linha de produção é constituída por dois secadores em paralelo: *sifter* norte e *sifter* sul.

No desenvolvimento das regressões lineares nos secadores, exclui-se o teor de O<sub>2</sub> como parâmetro de estudo. Este mantinha-se constante no 2º estágio do secador da 1ª linha de produção e no secador *sifter* norte da 2ª linha de produção. Também, se considerou as emissões de SO<sub>2</sub> desprezáveis pois a concentração e caudal mássico registados situavam-se abaixo do limite de detecção do aparelho de medida.

As regressões lineares obtidas para os diferentes focos de emissão estacionários das instalações de secagem, podem ser consultadas na Tabela 18 do Anexo VII.

Posteriormente, para cada uma das regressões expressas na Tabela 18 foi determinado o coeficiente de variância pela equação 3.3.1 e 3.3.2. Estes foram analisados, por poluente, para os quatros equipamentos de secagem, com o objectivo, de determinar qual o parâmetro de operação mais adequado para prever o caudal/concentração mássicos dum determinado poluente. Esta análise pode ser consultadas nas figuras 16 a 20 do Anexo III.

Recorrendo ao critério adoptado na secção anterior foi possível construir a Tabela 13. Esta refere o parâmetro mais apropriado para prever a concentração/caudal mássicos dos diversos poluentes nas fontes de emissão inerentes aos processos de secagem.

**Tabela 13 - Parâmetro de operação seleccionado na previsão da concentração e do caudal mássico de um determinado poluente e respectivo coeficiente de variância médio para as instalações de secagem de Mangualde.**

Poluente	Natureza da medição	Parâmetro	CV <sub>médio</sub> / %
Partículas	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Pressão <sub>absoluta</sub> / kPa	36,5
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	Velocidade / $\text{m s}^{-1}$	46,0
CO	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Temperatura / °C	109,1
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	Temperatura / °C	114,9
NO <sub>x</sub>	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Velocidade / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	33,5
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	Humidade <sub>absoluta</sub> / %	41,9
COVs	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Humidade <sub>absoluta</sub> / %	25,9
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	Caudal <sub>seco</sub> / $\text{Nm}^3\cdot\text{hr}^{-1}$	26,3
CO <sub>2</sub>	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Pressão <sub>absoluta</sub> / kPa	99,0
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	Pressão <sub>absoluta</sub> / kPa	100,1

Atendendo à Tabela 13, constatou-se que os parâmetros mais adequados para prever a concentração de partículas e CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> e COVs são a pressão absoluta, a temperatura, a velocidade e a humidade absoluta, respectivamente.

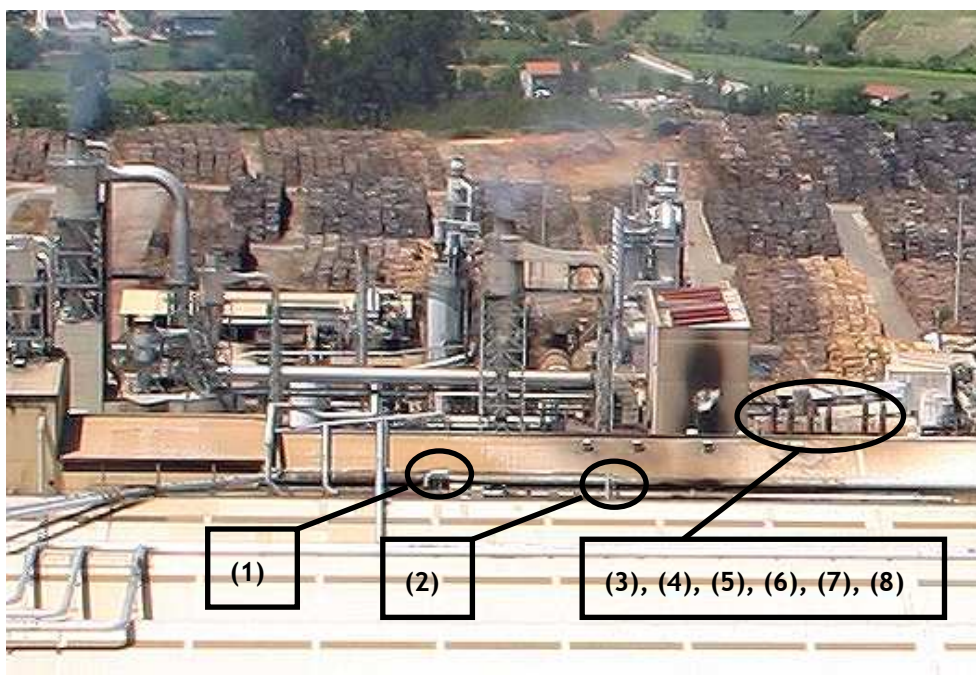
Sob ponto de vista de previsão do caudal mássico de partículas, CO, NO<sub>x</sub>, COVs e CO<sub>2</sub> os parâmetros mais apropriados são a velocidade, a temperatura, a humidade absoluta, o caudal seco em condições PTN e a pressão absoluta, respectivamente.

Contudo, à semelhança das instalações de combustão, os coeficientes de variância inerentes à emissão de poluentes nos processos de secagem são elevados. Estes implicam desvios significativos dos valores previstos pelas correlações em relação aos valores reais, pondo em causa a fiabilidade das correlações.

### 3.3.1.3 Unidades de prensagem

Na unidade fabril de Mangualde os equipamentos responsáveis pela prensagem são as prensas semi-contínua e contínua, presentes na 1ª e 2ª linhas de produção de aglomerado de fibras de média densidade, respectivamente.

A prensa da 1ª linha de produção apresenta seis focos de emissão estacionários, nomeadamente, as suas seis chaminés de exaustão. Por sua vez, a prensa contínua é constituída, apenas por duas chaminés de exaustão: à entrada e à saída de material. Os focos de emissão estacionários dos processos de prensagem em Mangualde podem ser visualizados na Figura 2.



*Figura 4 - Focos de emissão estacionários dos processos de prensagem de Mangualde.*

- (1) Chaminé à entrada da prensa da 2ª linha de produção de MDF (P2E)
- (2) Chaminé à saída da prensa da 2ª linha de produção de MDF (P2S)
- (3) 1ª Chaminé da prensa da 1ª linha de produção de MDF (P1C1)
- (4) 2ª Chaminé da prensa da 1ª linha de produção de MDF (P1C2)
- (5) 3ª Chaminé da prensa da 1ª linha de produção de MDF (P1C3)
- (6) 4ª Chaminé da prensa da 1ª linha de produção de MDF (P1C4)
- (7) 5ª Chaminé da prensa da 1ª linha de produção de MDF (P1C5)
- (8) 6ª Chaminé da prensa da 1ª linha de produção de MDF (P1C6)

Para os processos de prensagem, as regressões desenvolvidas visam apenas a quantificação das emissões de partículas e de COVs, uma vez que nestes processos não ocorre a combustão. Pela mesma razão, o teor em O<sub>2</sub> foi excluído como um parâmetro de operação em estudo.

As regressões lineares obtidas para os diferentes focos de emissão estacionários das prensas podem ser consultadas na Tabela 19 do Anexo VII.

Posteriormente, para cada uma das regressões expressas na Tabela 19 foi determinado o coeficiente de variância pela equação 3.3.2 e 3.3.1. Estes foram analisados, por poluente, para as oito chaminés das duas prensas, com o intuito de determinar qual o parâmetro de operação mais adequado para prever o caudal/concentração mássicos dum determinado poluente. Esta análise pode ser consultada nas figuras 21 a 22 do Anexo III.

Empregando o critério análogo das secções anteriores foi possível construir a Tabela 14. Esta relaciona o parâmetro apropriado na previsão da concentração/caudal mássicos dos diversos poluentes para os processos de prensagem da unidade fabril de Mangualde.

*Tabela 14 - Parâmetro de operação seleccionado na previsão da concentração e do caudal mássico de um determinado poluente e respectivo coeficiente de variância médio para as instalações de prensagem de Mangualde.*

Poluente	Natureza da medição	Parâmetro	CV <sub>médio</sub> / %
Partículas	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Humidade <sub>absoluta</sub> / %	59,5
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	Humidade <sub>absoluta</sub> / %	59,7
COVs	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Temperatura / °C	29,2
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	Velocidade / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	40,2

Atendendo à Tabela 17, averiguou-se que os parâmetros mais adequados para prever a concentração de partículas e COVs são a humidade absoluta e a temperatura, respectivamente.

Sob ponto de vista de previsão do caudal mássico de partículas e COVs, os parâmetros mais apropriados são a humidade absoluta e a velocidade.

No entanto, os coeficientes de variância inerentes à emissão de poluentes nos processos de prensagem são elevados, ou seja, o valor previsto pela correlação apresenta desvios significativos em relação ao real.

### 3.2.1 Oliveira do Hospital

A unidade de Oliveira do Hospital é constituída por uma única linha de produção de aglomerado de partículas. Nesta linha de produção foram estudadas seis fontes de emissão estacionárias: a chaminé de exaustão do precipitador electrostático húmido, a chaminé da caldeira, as duas chaminés de exaustão dos filtros de despoejamento da lixadora e as duas chaminés dos filtros de despoejamento da formadora.

Além destas seis, a unidade de Oliveira do Hospital também apresenta outras dez fontes de emissão estacionárias. No entanto, estas não foram consideradas na aplicação do método preditivo devido à carência de informação relativamente aos poluentes emitidos. Estes focos de emissão são sujeitos a controlo de emissões trianuais.

Para aplicação do método preditivo à unidade de Oliveira, dividiu-se os focos de emissão em dois grupos: unidades de combustão e filtros.

Na unidade de Oliveira do Hospital, o respectivo método não foi aplicado na previsão de emissões de CO<sub>2</sub> por carência de informação.

#### 3.2.1.1 Unidades de combustão

Na unidade de Oliveira do Hospital, as instalações de combustão englobam a caldeira *Vyncke* cuja potência instalada é de 64,3 MW e o precipitador electrostático húmido situado a jusante do secador de tambor. Apesar, de o precipitador electrostático húmido não ser uma unidade aonde ocorra combustão, este foi incluído neste grupo pois é receptor dos gases de combustão da caldeira. Os focos de emissão estacionários das instalações de combustão de Oliveira do Hospital podem ser visualizados na figura 5 e 6.



Figura 5 - Ilustração da chaminé da caldeira (C) em Oliveira do Hospital.



Figura 6 - Ilustração da chaminé do precipitador electrostático húmido, WESP (W), em Oliveira do Hospital.



As regressões lineares obtidas para as chaminés de exaustão dos equipamentos de combustão de Oliveira do Hospital, precipitador electrostático húmido, WESP, (W) e caldeira (C) estão apresentadas na Tabela 20 do Anexo VII.

Continuamente, para cada uma das regressões expressas na Tabela 20 foi determinado o coeficiente de variância pela equação 3.3.1 e 3.3.2. Estes foram analisados, por poluente, para o WESP e caldeira, com o intuito de determinar qual o parâmetro de operação mais adequado para prever o caudal/concentração mássicos dum determinado poluente. Esta análise pode ser consultada nas figuras 23 a 27 do Anexo IV.

Empregando o procedimento análogo das secções anteriores construiu-se a Tabela 15. Esta menciona o parâmetro mais apropriado na estimativa de emissões dos diversos poluentes para os processos de combustão na unidade de Oliveira do Hospital.

**Tabela 15** - Parâmetro de operação seleccionado na previsão da concentração e do caudal mássico de um determinado poluente e respectivo coeficiente de variância médio para as instalações de combustão de Oliveira do Hospital.

Poluente	Natureza da medição	Parâmetro	CV <sub>médio</sub> / %
Partículas	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Humidade <sub>absoluta</sub> / %	6,7
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	Caudal <sub>seco</sub> / $\text{Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$	20,3
CO	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Teor de $\text{O}_2$ / %	57,3
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	Velocidade / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	70,2
$\text{SO}_2$	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Temperatura / °C	108,6
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	Temperatura / °C	89,6
$\text{NO}_x$	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Caudal <sub>seco</sub> / $\text{Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$	2,1
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	Caudal <sub>seco</sub> / $\text{Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$	2,5
COVs	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Caudal <sub>seco</sub> / $\text{Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$	23,4
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	Humidade <sub>absoluta</sub> / %	5,7

Com base na Tabela 15, concluiu-se que os parâmetros mais adequados para prever a concentração de  $\text{NO}_x$  e COVs, partículas, CO e  $\text{SO}_2$  são o caudal seco em condições PTN, a humidade absoluta, o teor de  $\text{O}_2$  e a temperatura, respectivamente.

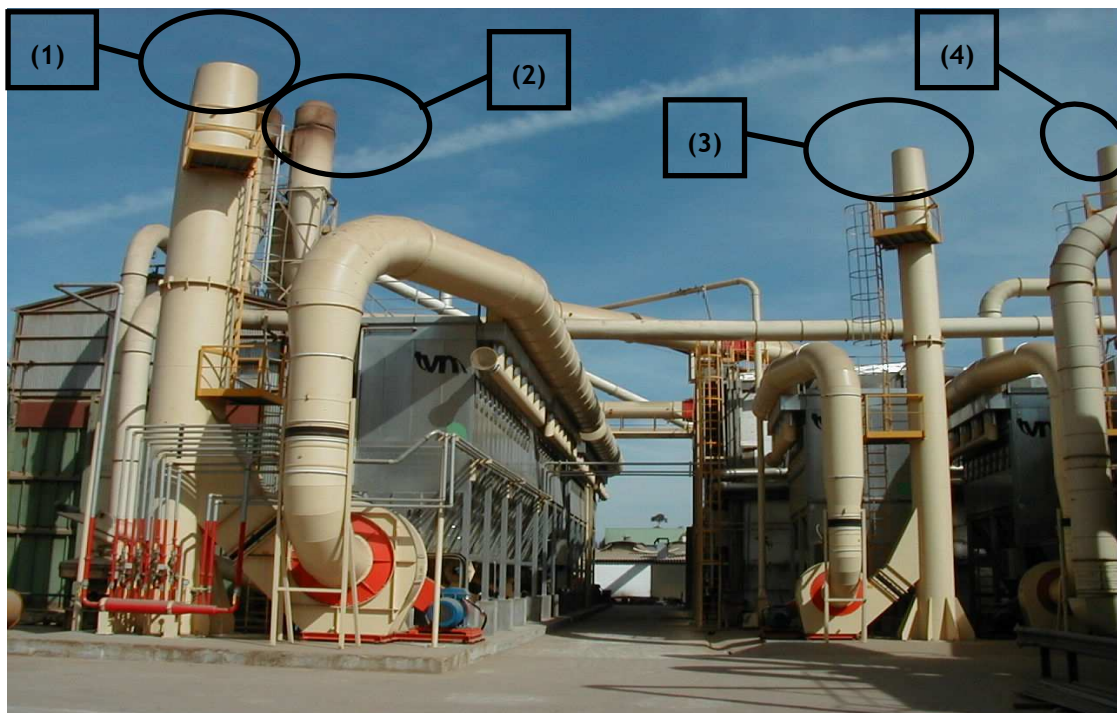
Sob ponto de vista de previsão do caudal mássico de partículas e  $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{SO}_2$  e COVs, os parâmetros mais apropriados são o caudal seco em condições PTN, a velocidade, a temperatura e a humidade absoluta.

No entanto, à excepção casos pontuais, como por exemplo a previsão de emissões de  $\text{NO}_x$ , os coeficientes de variância inerentes à emissão de poluentes nos processos de combustão em Oliveira do Hospital são elevados, ou seja, o valor previsto pela correlação apresenta desvios significativos em relação ao experimental.

### 3.2.1.2 Filtros

Na unidade de Oliveira do Hospital, os filtros estão presentes em diferentes etapas do processo de produção de aglomerado de partículas, sendo a sua função, controlar a emissão de partículas para a atmosfera. Por esta razão, as regressões obtidas para estes equipamentos visam apenas a quantificação de emissão de partículas.

Habitualmente os filtros estão presentes a jusante dos processos de lixagem (filtros de despoejamento da lixadora nº1 e nº2), de prensagem (filtro de exaustão da prensa e da esquadadora) e de refinação (filtros de despoejamento das formadoras nº1 e nº2 e da Serra Diagonal). No entanto, apenas vão ser estudados os filtros de despoejamento da lixadora e das formadoras com objectivo de prever a emissão de partículas desses equipamentos. Os restantes, sujeitos a medições obrigatórias trianuais, foram excluídos por carência de informação.



*Figura 7 - Ilustração das chaminés de exaustão dos filtros despoejamento da lixadora e da formadora em Oliveira do Hospital.*

- (1) Filtro de despoejamento da lixadora nº1 (FL1)
- (2) Filtro de despoejamento da lixadora nº2 (FL2)
- (3) Filtro de despoejamento da formadora nº1 (FF1)
- (4) Filtro de despoejamento da formadora nº2 (FF2)



As regressões lineares obtidas para os filtros de despoeiramento nº1 e nº2 da lixadora (FL1 e FL2) e da formadora (FF1 e FF2) de Oliveira do Hospital estão apresentadas na Tabela 21 do Anexo VII. O teor de O<sub>2</sub> foi excluído como parâmetro de operação em estudo, pois nestes processos não ocorre combustão.

Seguidamente, para cada uma das regressões lineares foi determinado o coeficiente de variância pela equação 3.3.1 e 3.3.2. Estes foram analisados por poluente para os filtros, com o intuito de determinar, qual o parâmetro de operação mais adequado para prever o caudal/concentração mássicos dum determinado poluente. Esta análise pode ser consultadas na figura 28 do Anexo IV.

Empregando o mesmo critério das secções anteriores, foi possível construir a tabela 16. Esta relaciona o parâmetro apropriado na previsão da concentração/ caudal mássicos dos diversos poluentes para os processos de combustão na unidade de Oliveira do Hospital.

**Tabela 16 - Parâmetro de operação seleccionado na previsão da concentração e do caudal mássico de partículas e respectivo coeficiente de variância médio para os filtros de despoeiramento de Oliveira do Hospital.**

Poluente	Natureza da medição	Parâmetro	CV <sub>médio</sub> / %
Partículas	$C_m / \text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Humidade <sub>absoluta</sub> / %	6,7
	$Q_m / \text{kg}\cdot\text{hr}^{-1}$	Velocidade / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	20,3

Com base na Tabela 16, concluiu-se que os parâmetros mais adequados para prever a concentração e o caudal mássico de partículas são a humidade absoluta e a velocidade, respectivamente.

Contudo, o CV<sub>médio</sub> obtido para previsão do caudal mássico é elevado, ou seja, o valor previsto pela regressão apresenta desvios em relação ao experimental.

### 3.4 Proposta de Metodologia

O trabalho elaborado nas secções anteriores deste capítulo foi realizado com o objectivo de seleccionar a metodologia mais vantajosa a implementar nas unidades da Sonae Indústria. Esta metodologia deve obedecer aos seguintes critérios: a) de fácil implementação; b) ser abrangente a qualquer unidade; e c) ser global, coerente e consistente. A facilidade de implementação compreende que esta deve ser de execução simples e necessitar de informação já existente nas 34 unidades fabris da Sonae Indústria; ser abrangente compreende que esta deve ser aplicável a qualquer unidade da Sonae Indústria, cada uma com equipamentos e configurações processuais distintos; e quanto a ser global, coerente e consistente significa realizar o inventário de emissões de todos os poluentes relevantes das unidades da Sonae Indústria de forma fiável no tempo.

Atendendo aos critérios mencionados, a metodologia seleccionada foi a metodologia “factores de emissão”. A aplicação desta metodologia envolve o preenchimento duma folha de inventário padrão de emissões atmosféricas para todos os poluentes (ver Anexo VI), recorrendo à folha de cálculo desenvolvida durante este projecto para a respectiva metodologia.

Por sua vez, a aplicação da metodologia “análise de combustível” restringe-se à estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>. Relativamente ao “PEMS”, apesar de ser aplicável quer a todas as unidades quer a todos os poluentes, necessita da execução dum trabalho complexo a nível de matemático e estatístico o que impossibilita a sua implementação expedita nas inúmeras unidades da Sonae Indústria.

Contudo, a implementação da metodologia de “factores de emissão”, em definitivo, necessita da determinação, *à priori*, dos “factores de emissão” específicos por equipamento para cada uma das unidades fabris. Essa tarefa deverá ser realizada numa fase seguinte a este projecto. Para o efeito, foi estabelecido um procedimento para determinar os factores de emissão de cada poluente específicos por equipamentos da unidade a estudar. Este pode ser consultado no Anexo V. Além disso, o factor desenvolvido para uma unidade pode ser utilizado noutra que possuiu equipamentos cujas capacidades de produção e secagem (prensas e secadores) e potência instaladas (caldeira) são idênticas.

## 4 Conclusões

Actualmente, existem seis metodologias internacionalmente aceites para a quantificar as emissões atmosféricas de CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COVs, partículas e metais pesados. Essas metodologias são: “factores de emissão”, “amostragem”, “sistema de monitorização de emissões em contínuo” (CEMS), “sistema preditivo de monitorização de emissões” (PEMS), “balanço material” e “análise de combustível”. Das seis metodologias, somente as quatro primeiras são universais, ou seja, aplicáveis a qualquer poluente. Por sua vez, as restantes metodologias são mais restritas no âmbito de aplicação; o “balanço material” é aplicado na estimativa dos COVs, partículas e metais pesados; e a “análise de combustível” é habitualmente utilizada na quantificação de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e COVs.

Por razões de natureza financeira, tecnológica e carência de informação, somente três das seis metodologias internacionais são passíveis de aplicação nas unidades da Sonae Indústria. Essas metodologias são: “factores de emissão”, “PEMS” e “análise de combustível”.

Após aplicação da metodologia “factores de emissão”, concluiu-se que nas unidades da Sonae Indústria, as emissões de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COVs, e partículas são as mais relevantes. As emissões anuais destes poluentes estimadas para as unidades de Oliveira do Hospital e de Mangualde no ano de 2008 foram: 71066 e 70440, 758 e 703, 41 e 1189 toneladas, respectivamente. A elevada diferença na emissão de partículas entre ambas unidades deve-se à existência de equipamentos de remoção de partículas muito eficientes na unidade de Oliveira do Hospital, nomeadamente pelo uso de um precipitador electrostático húmido e filtros húmidos.

Para validar os resultados obtidos por esta metodologia, estabeleceu-se uma comparação, por poluente, entre as emissões mensais de 2008 previstas pelos factores de emissão com as medições realizadas *in loco* durante o mesmo mês. Essa comparação revelou a existência de desvios consideráveis que podem ser atribuídos à inadequação dos factores de emissão existentes na literatura ou à pequena fiabilidade dos dados experimentais realizados por uma empresa subcontratada.

A metodologia “análise combustível” foi aplicada na estimativa de emissões anuais de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, obtendo-se os seguintes resultados para o ano de 2008: 71379 e 126, 69563 e 86 toneladas para Oliveira do Hospital e Mangualde, respectivamente.

Comparando esta, com a metodologia “factores de emissão” evidencia-se uma similitude entre as emissões de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> previstos por ambas as metodologias. Esta proximidade é explicada pelo facto de ambas as metodologias se basearem nos mesmos princípios para a estimativa das emissões destes poluentes.

Relativamente ao *PEMS* constatou-se que existem diferenças significativas entre os valores previstos e os valores obtidos através das medições *in loco* dos vários poluentes. No entanto, e segundo informação interna, a empresa subcontratada não terá seguido os melhores procedimentos, devendo as medições *in loco* por esta realizadas apresentar erros elevados.

Em suma, das três metodologias aplicadas durante a realização deste projecto, duas delas, as metodologias “factores de emissão” e “análise de combustível” têm um desempenho semelhante na estimativa das emissões atmosféricas. Contudo, a primeira é mais abrangente pois é capaz de estimar as emissões de todos os poluentes relevantes das operações da Sonae Indústria. Por outro lado, a metodologia *PEMS* é de aplicação complexa, quer a nível matemático quer a nível estatístico, o que condiciona a sua implementação expedita nas inúmeras unidades da Sonae Indústria.

Conclui-se desta forma que a metodologia mais apropriada à realidade da Sonae Indústria é a metodologia “factores de emissão”. A implementação desta metodologia baseia-se no preenchimento dum formulário padrão de emissões atmosféricas, recorrendo à folha de cálculo desenvolvida. Por outro lado, a determinação dos factores de emissão para cada equipamento, necessários ao modelo, exige a realização dum procedimento de caracterização padrão. Este procedimento também foi desenvolvido e é apresentado no anexo V.

## 5 Avaliação do trabalho realizado

### 5.1 Objectivos Realizados

No decorrer deste trabalho assumiu-se cumprir os seguintes objectivos: realizar o levantamento das metodologias internacionalmente aceites de quantificação de emissões atmosféricas; propor uma metodologia global, coerente e consistente, com o objectivo de realizar o inventário contínuo de emissões atmosféricas de forma fiável e comparável no tempo; e implementar a metodologia proposta nas operações das unidades de Oliveira do Hospital e de Mangualde da Sonae Indústria durante um trimestre de 2009. Dos objectivos mencionados, todos, à excepção do último, foram concluídos.

### 5.2 Outros Trabalhos Realizados

Paralelamente a este projecto, durante a realização deste estágio na Sonae Indústria foi realizado um outro trabalho que consistiu na quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> das 34 unidades da Sonae Indústria. Para tal, utilizou-se a mesma folha de cálculo desenvolvida para a metodologia “factores de emissão”.

### 5.3 Trabalho Futuro

Neste trabalho não foi possível a realização do inventário de emissões atmosféricas das unidades de Oliveira do Hospital e de Mangualde durante um trimestre de 2009. Esta impossibilidade deveu-se à inexistência de factores de emissão adequados para os diferentes equipamentos das operações da Sonae Indústria e/ou escassa fiabilidade dos dados experimentais relativos às emissões. Para ultrapassar esta limitação foi sugerido um procedimento para determinação dos factores de emissão específicos dos equipamentos referidos. Esta tarefa deverá ser realizada no futuro.

### 5.4 Apreciação final

Globalmente, este trabalho foi uma experiência enriquecedora uma vez que permitiu um contacto directo com a realidade empresarial, bem como, com excelentes profissionais de várias áreas e a aplicação dos conhecimentos adquiridos durante a minha formação em Engenharia Química.

Este trabalho, também, foi um desafio interessante e interminável; interessante pois permitiu a aquisição de novos conhecimentos numa área, a de quantificação de emissões atmosféricas, em que a minha experiência era quase nula; e interminável porque há ainda muito trabalho a ser desenvolvido no futuro, para implementar, em definitivo a metodologia proposta neste trabalho.

## Referências

- [1]. Comité Europeu de Normalização(CEN) “Norma prEN 15052:2006 (E); " Resilient, textile and laminate floor coverings - Evaluation and requirements of volatile organic compounds (VOCs) emissions".”, WRI/WBCSD, 2006.
- [2]. Eastern Research Group Inc. “Emission inventory improvement program, Volume II: chapter 7, Preferred and Alternative Methods for Estimating Air Emissions from Surface Coating Operations.” North Carolina, EPA, 2002.
- [3]. Eastern Research Group Inc. “AP-42- Compilation of Air Pollutants Emissions Factors Volume1: Stationary Point And Area Sources, Chapter 1: External Combustion Sources.” North Carolina”, EPA, 1995.
- [4]. Eastern Research Group Inc. “Emission inventory improvement Program Volume II: chapter 2, Preferred and Alternative Methods For Estimating Air Emissions from Boilers.” North Carolina, EPA, 2001.
- [5]. Eastern Research Group, Inc. “AP-42: Compilation of Air Pollutants Emissions Factors Volume1: Stationary Point And Area Sources, Chapter 10: Wood Products Industry.” North Carolina”, EPA, 1995.
- [6]. Eastern Research Group, Inc. “AP-42: Compilation of Air Pollutants Emissions Factors Volume1: Stationary Point And Area Sources, Chapter 3: Stationay Internal Combustion Sources.” North Carolina, EPA, 1995.
- [7]. EPA. “<http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate.html>.”, EPA, acedido a 15 de Março de 2009.
- [8]. Esquivel, M, e J, Vasconcelos. “Etapas de Realização dos trabalhos de LEQ IV.”, pags 7-15, Lisboa, IST-Universidade de Lisboa, 2002.
- [9]. ISO, International Organization for Standardization. <http://www.iso.org/iso/>. ISO, acedido a 15 de Março de 2009.
- [10]. NCASI, National Council for Air and Stream Improvement. “Calculation tools for Estimating Greenhouse Gas Emissions from Wood Product Facilities.”, North Carolina, Research Triangle Park, 2005.
- [11]. Office of Air Quality Planning and Standards, EPA, “Procedures for Preparing Emission Factor Documents, Chapter 2.”, pags 2-7, North Carolina, Research Triangle Park, 1997.
- [12]. Planeamento e Controlo de Gestão, “*Planning and Management Control - Procedures Manual*.” Maia, Sonae Indústria, SGPS, SA, 2007.

- 
- [13]. Sonae Indústria, "*Relatório de Sustentabilidade*", Maia, Sonae Indústria, SGPS, SA, 2007.
- [14]. Sonae Indústria, "*Relatório de Sustentabilidade*", Maia, Sonae Indústria, SGPS, SA, 2006.
- [15]. Tecnilab, "Advanced Particulated Monitoring Solutions for Dryers.", Maia, PCME, 2009.
- [16]. Wartsila Inc., "Cogeneration and Emissions.", *ICCI*. Istanbul, 2004.
- [17]. WBCSD, "*Calculating CO2 Emissions From the combustion of standard fuels and from electricity/steam purchase*", Washington, GHG Protocol, 2001.
- [18]. WBCSD, "*Calculation tool for Direct Emissions from Stationary Combustion.*", Washington, 2005.
- [19]. WBCSD, "GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard, Appendix E: Base year recalculation methodologies for structural changes.", Washington: WBCSD/WRI, 2005.
- [20]. WBCSD, "The GHG Protocol for Project Accounting.", pags 72-80, Washington, WRI/WBCSD, 2005.
- [21]. WBCSD, "*The Greenhouse Protocol: a corporate accounting and reporting standard (revised edition)*", Washington, WRI/WBCSD, 2004.
- [22]. WBCSD, "GHG Protocol Corporate Standard, Appendix F: Categorizing GHG emissions Associated with Leased Assets." Washington, WRI/WBCSD, 2006.

## Anexo I - Diagrama processual de produção de Aglomerado de partículas

O diagrama processual de produção de aglomerado de partículas (PB) em Oliveira do Hospital está esquematizado na Figura 8.

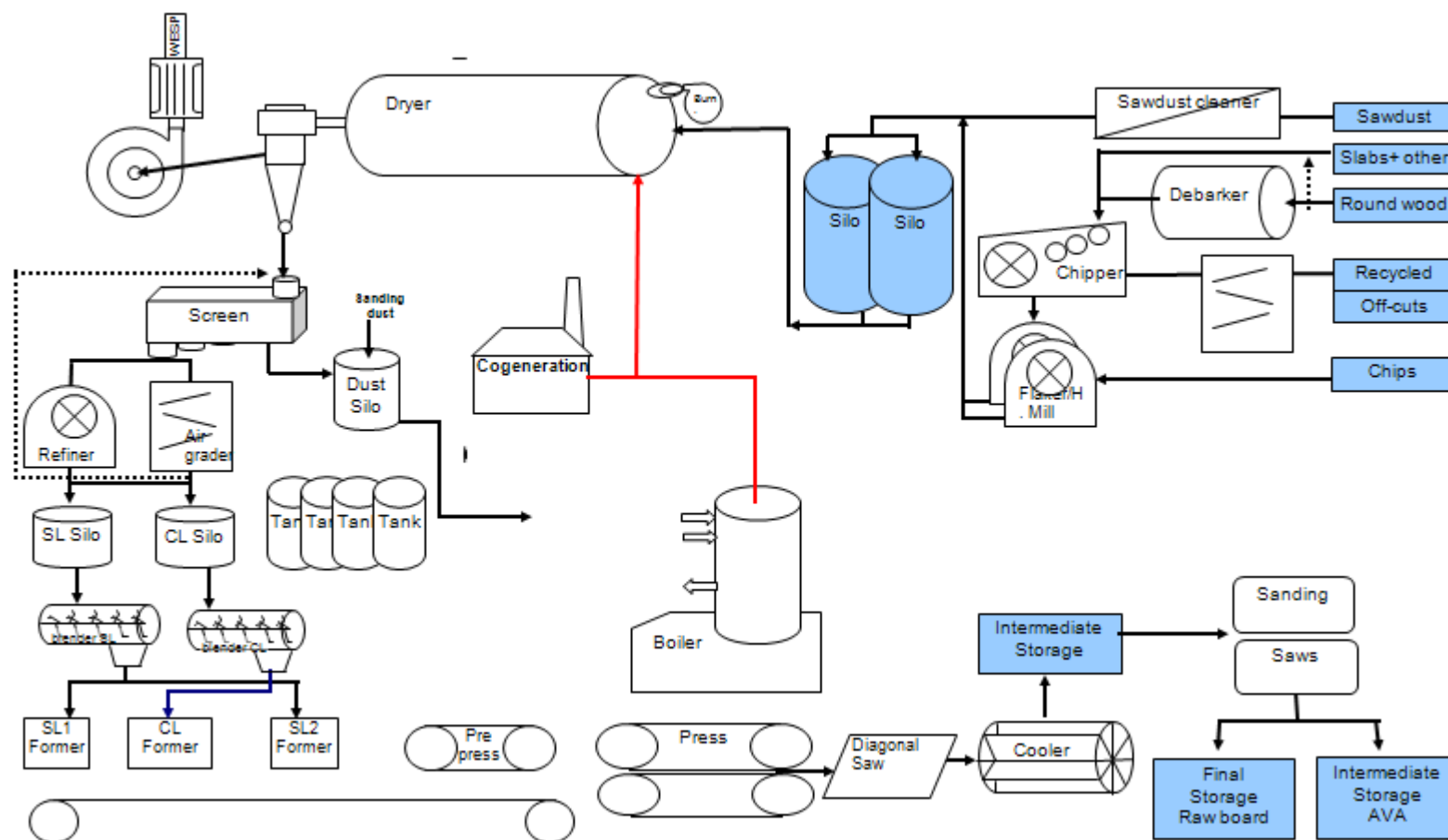


Figura 8 - Diagrama Processual de produção do aglomerado de partículas (PB) em Oliveira do Hospital.



## Anexo II - Diagrama Processual de produção de aglomerado de fibras de média de densidade

O diagrama processual de produção de aglomerado de partículas em Mangualde está esquematizado na Figura 9.

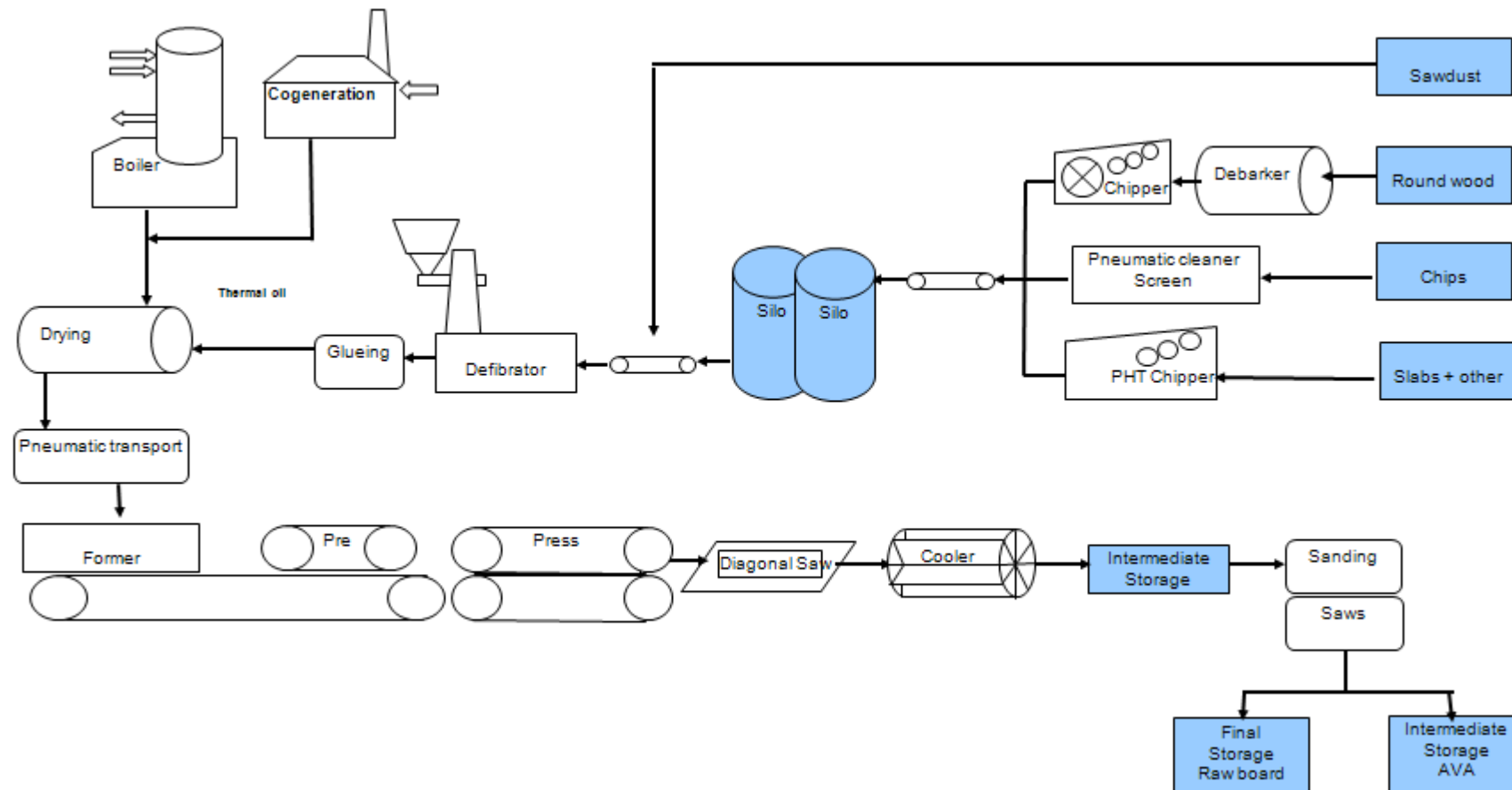


Figura 9 - Diagrama Processual de produção do aglomerado de fibras de média densidade (MDF) em Mangualde.

## Anexo III - Análise dos coeficientes de variação com os parâmetros de operação para as instalações de combustão, secagem e prensagem para a unidade fabril de Mangualde

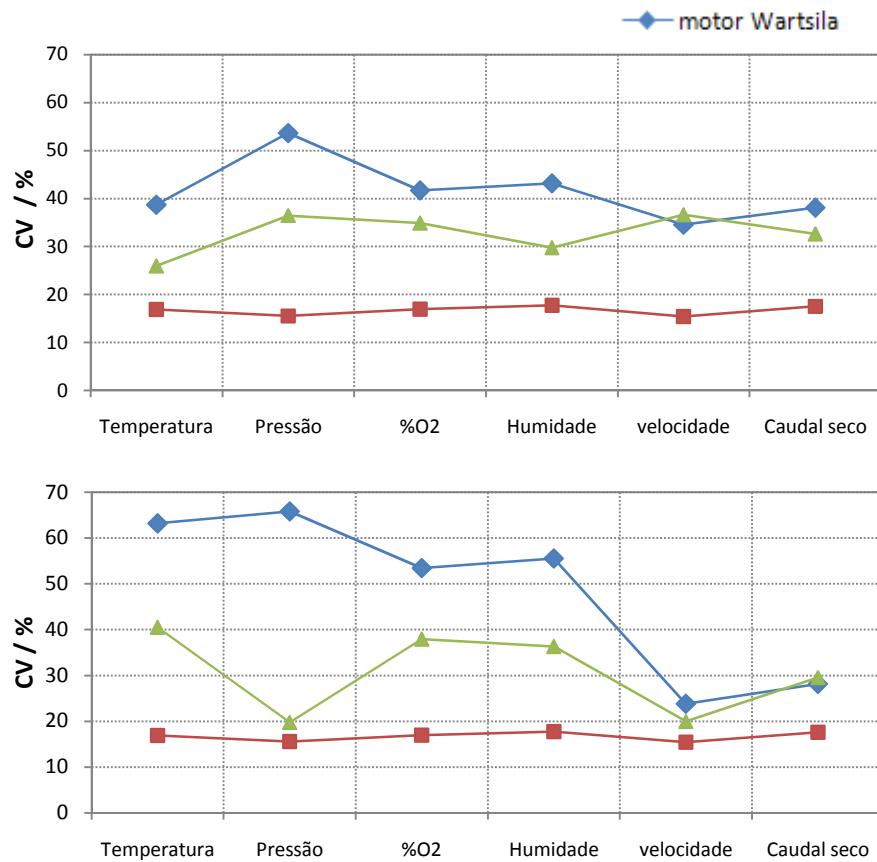


Figura 10 - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de partículas para as diferentes instalações de combustão de Mangualde.

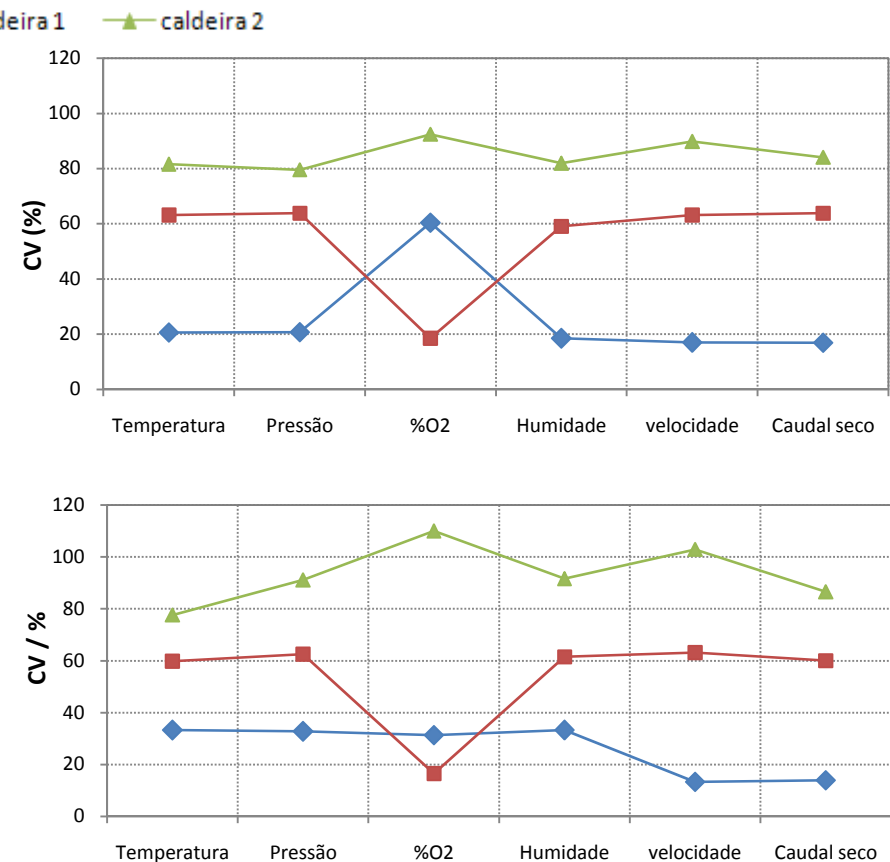
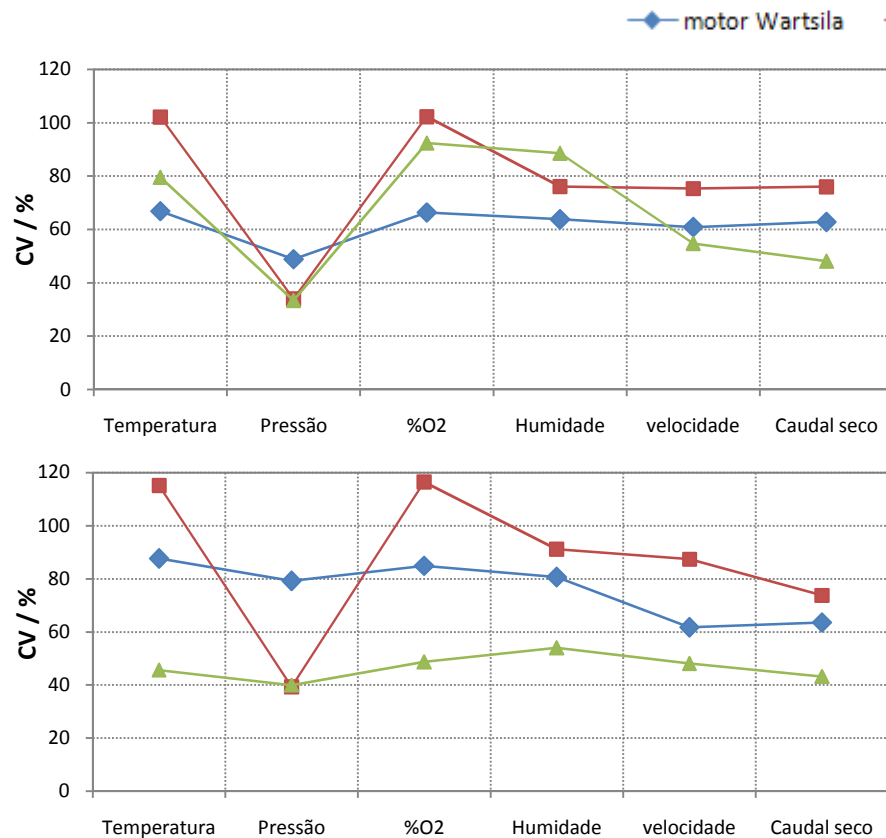
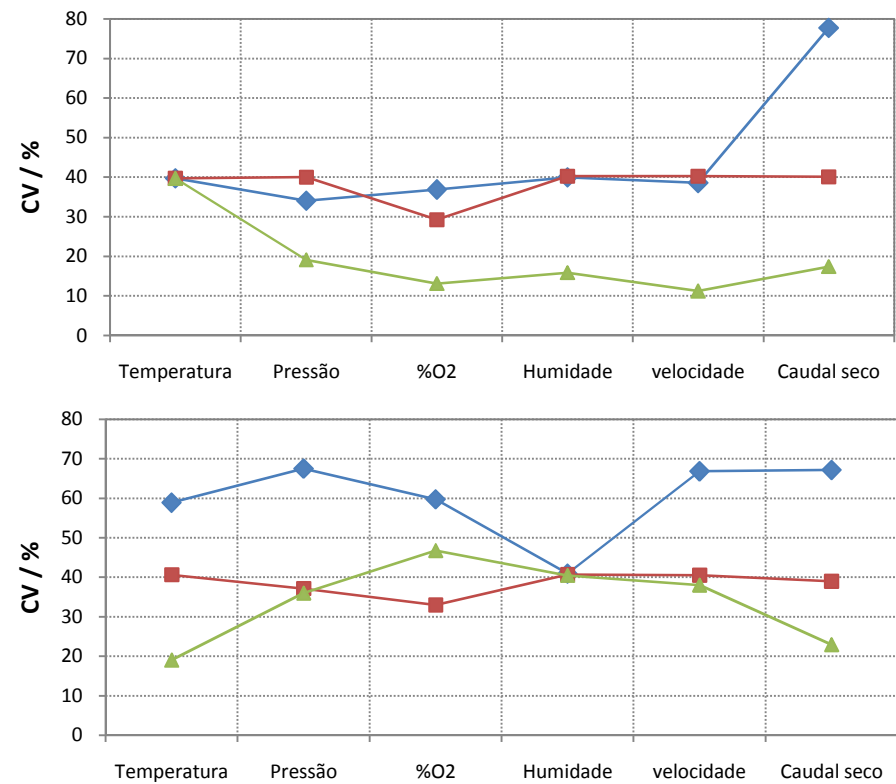


Figura 11 - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de CO para as diferentes instalações de combustão de Mangualde.



**Figura 12** - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de SO<sub>2</sub> para as diferentes instalações de combustão de Mangualde.



**Figura 13** - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de NO<sub>x</sub> para as diferentes instalações de combustão de Mangualde.

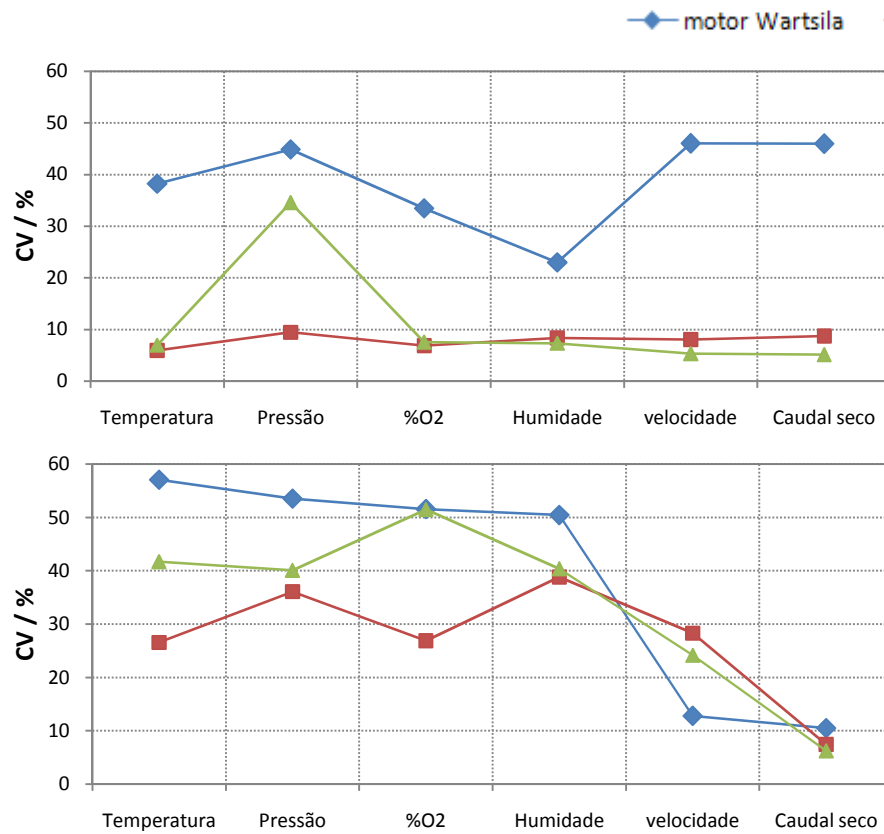


Figura 14 - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de COVs para as diferentes instalações de combustão de Mangualde.

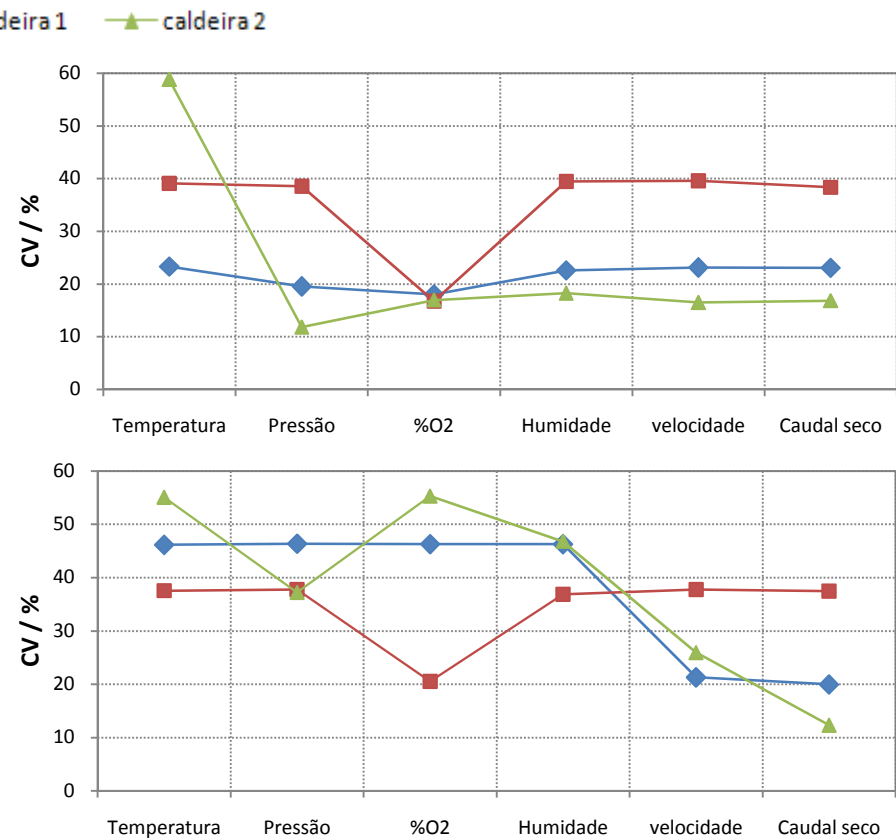


Figura 15 - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de CO<sub>2</sub> para as diferentes instalações de combustão de Mangualde.

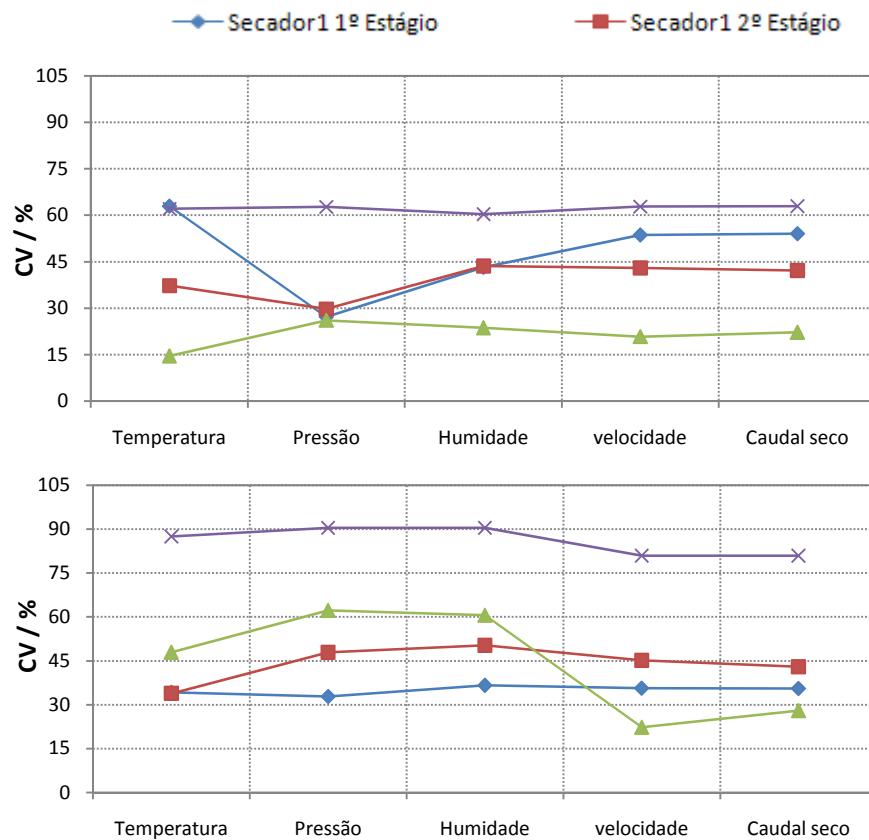


Figura 16 - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de partículas para as diferentes instalações de secagem de Mangualde.

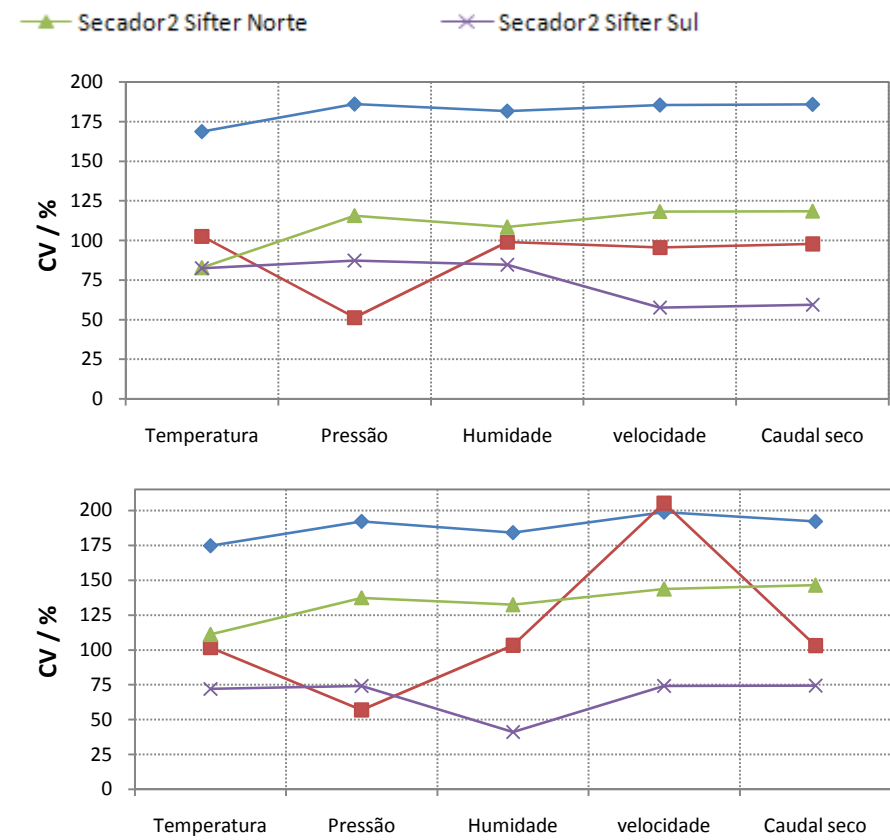


Figura 17 - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de CO para as diferentes instalações de secagem de Mangualde.

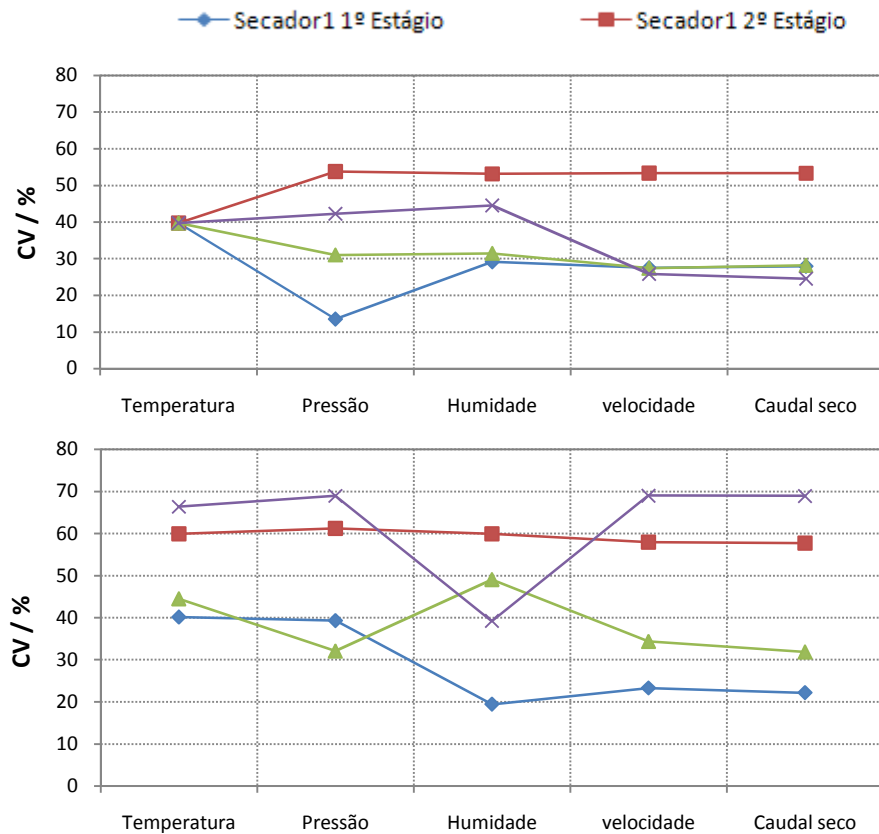


Figura 18 - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de NO<sub>x</sub> para as diferentes instalações de secagem de Mangualde.

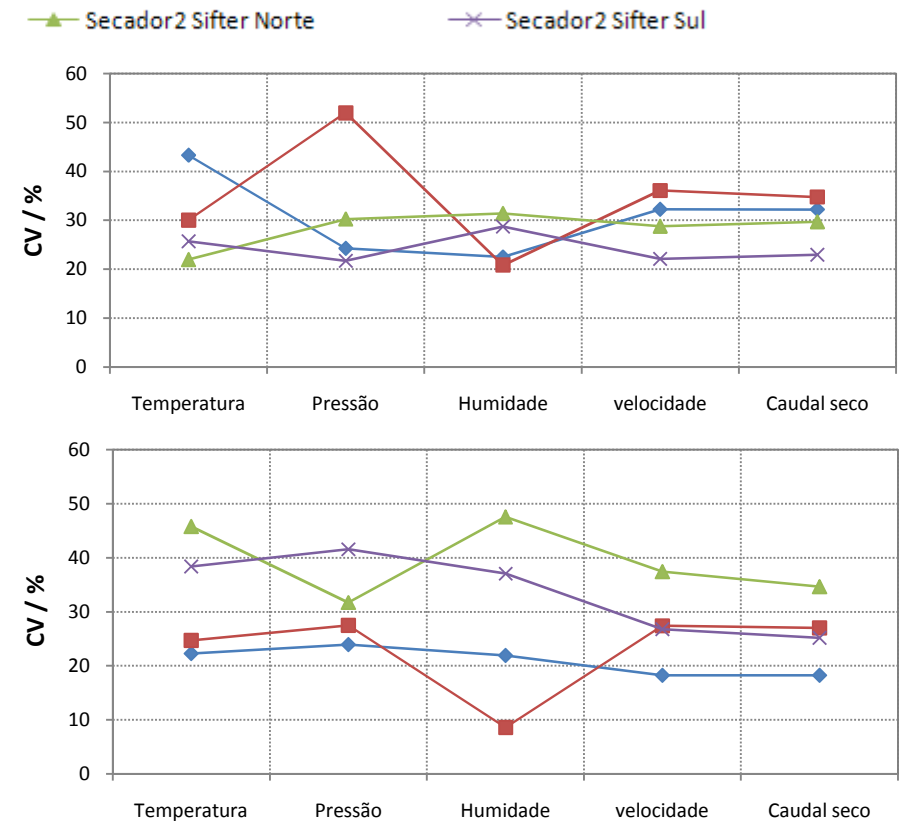
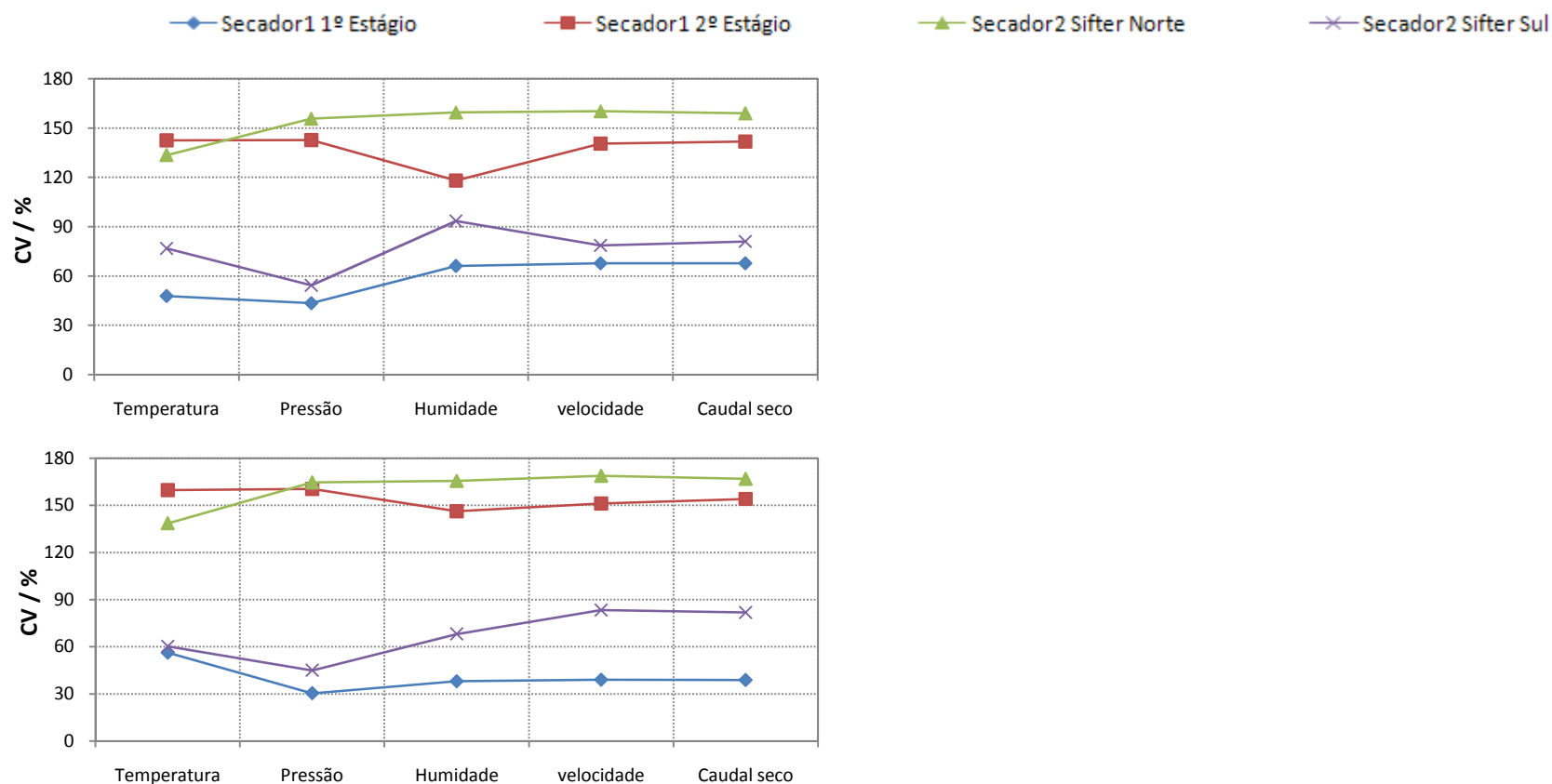


Figura 19 - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de COVs para as diferentes instalações de secagem de Mangualde.



*Figura 20 - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de  $CO_2$  para as diferentes instalações de secagem de Mangualde.*



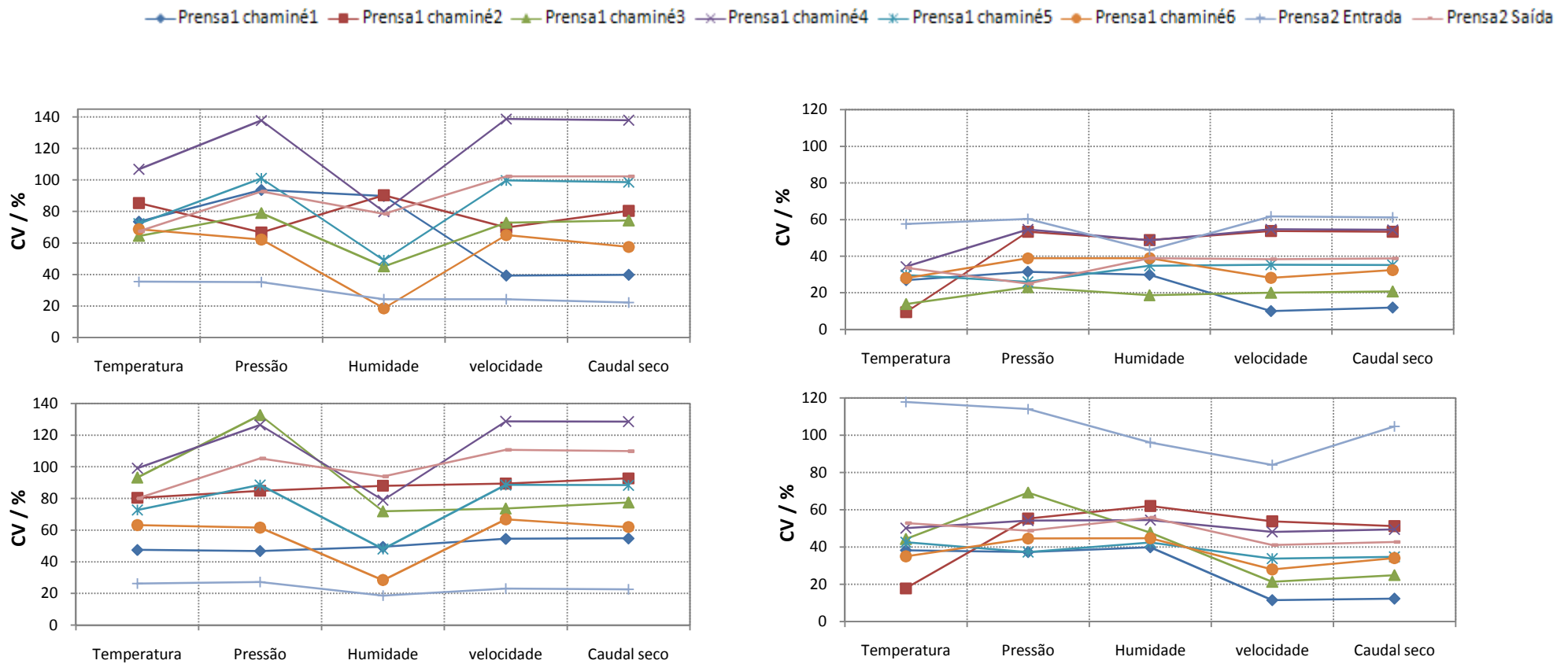
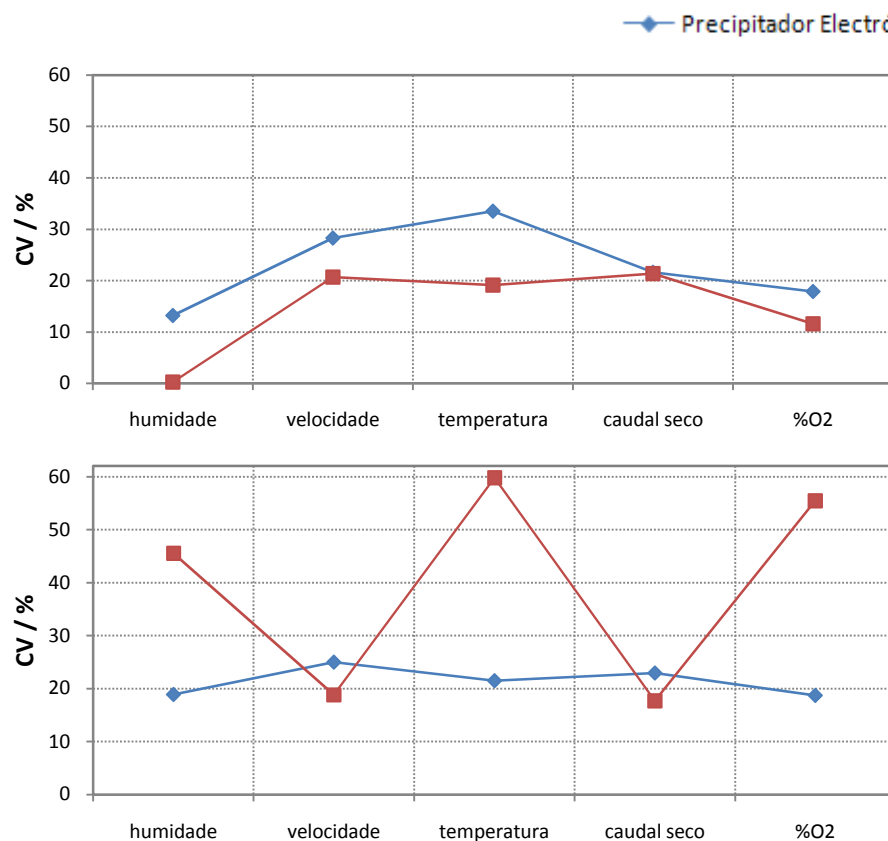


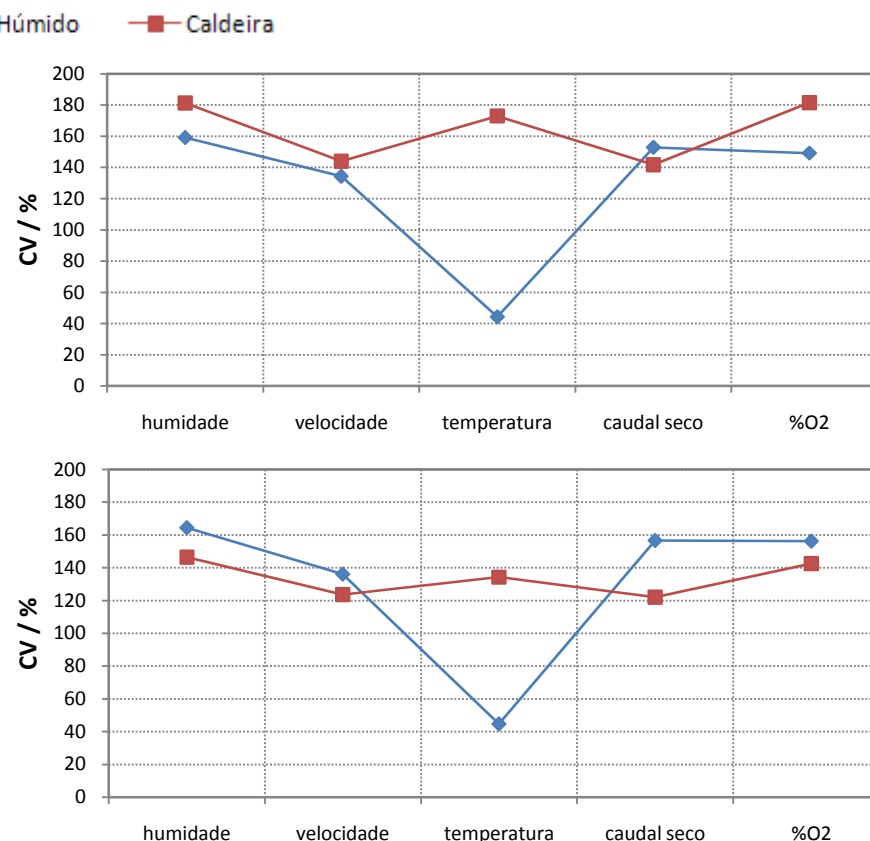
Figura 21 - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de partículas para as diferentes instalações de prensagem de Mangualde.

Figura 22 - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de COVs para as diferentes instalações de prensagem de Mangualde.

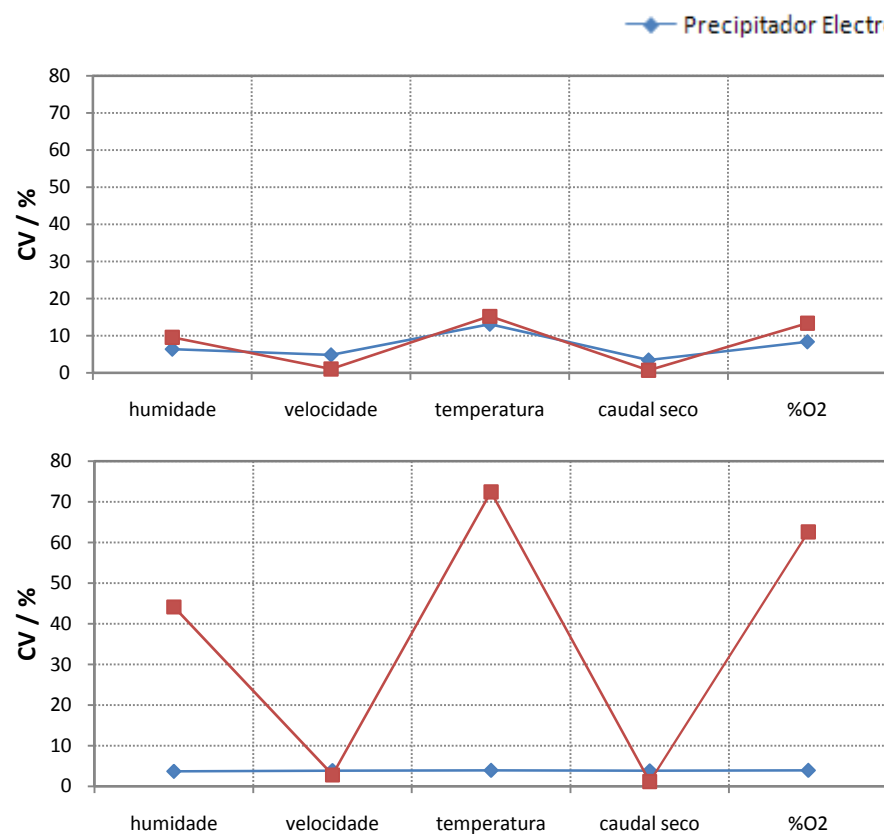
## Anexo IV - Análise dos coeficientes de variação com os parâmetros de operação para as instalações de combustão e filtros para a unidade fabril de Oliveira do Hospital



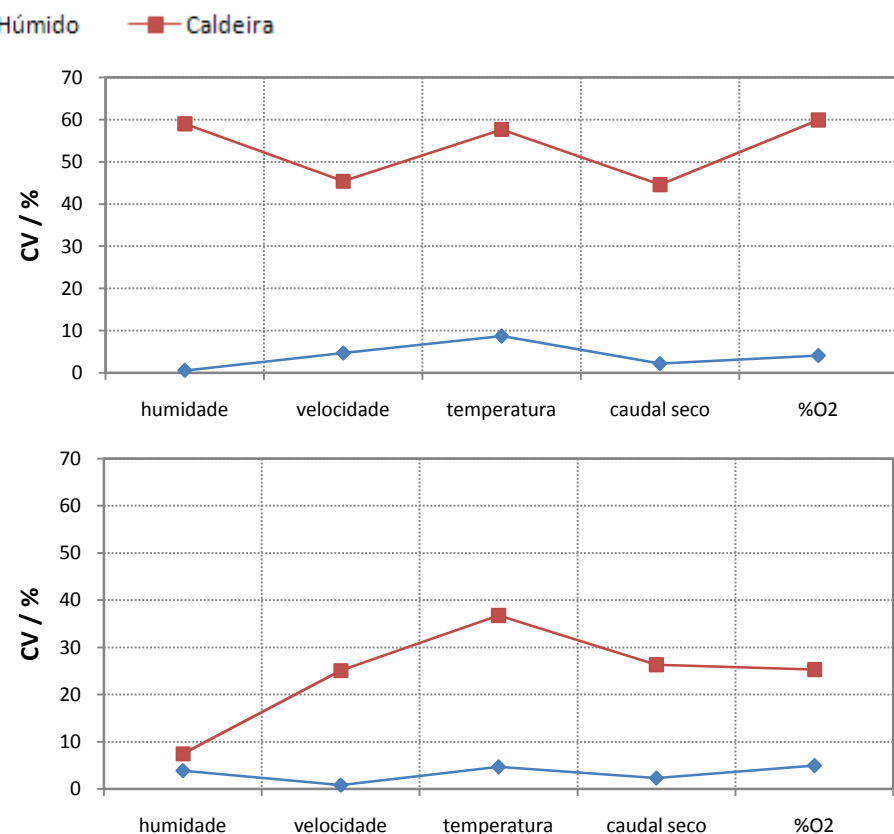
**Figura 23** - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de partículas para as diferentes instalações de combustão de Oliveira do Hospital.



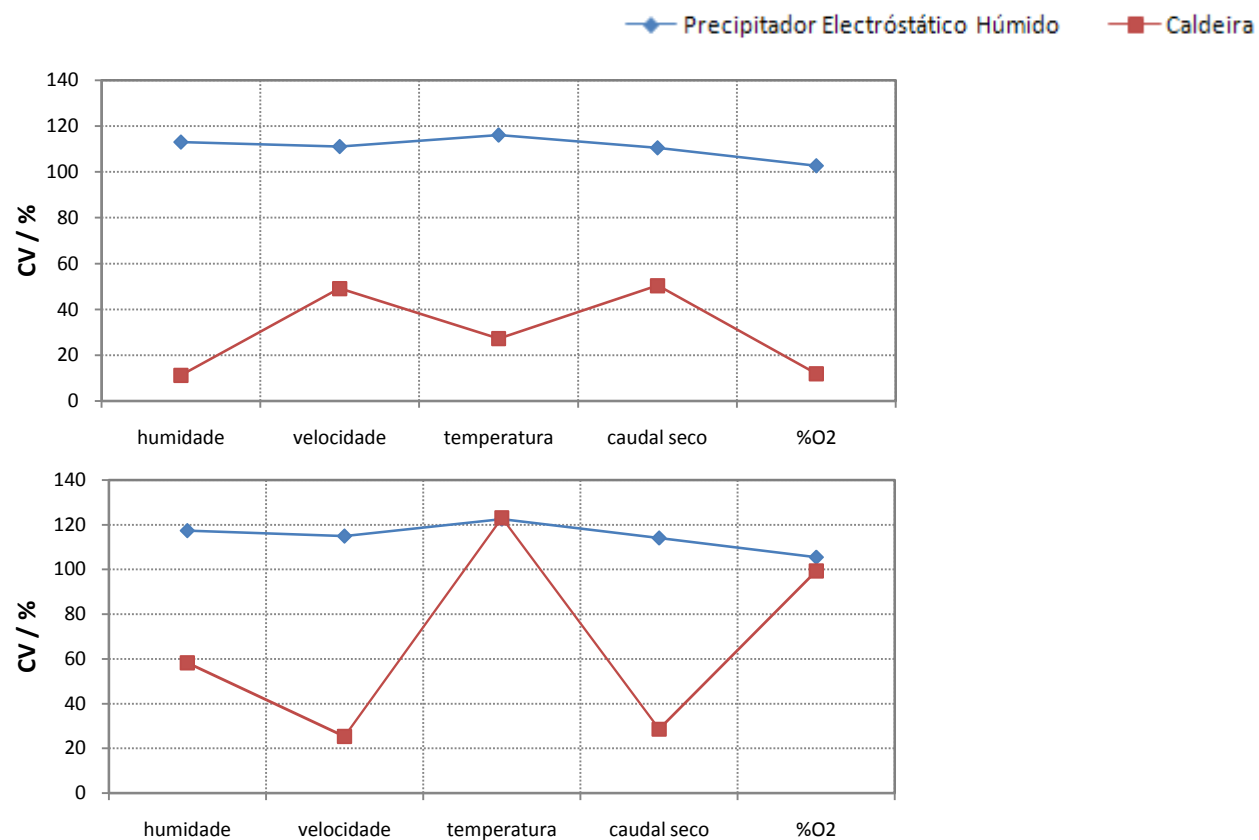
**Figura 24** - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de SO<sub>2</sub> para as diferentes instalações de combustão de Oliveira do Hospital.



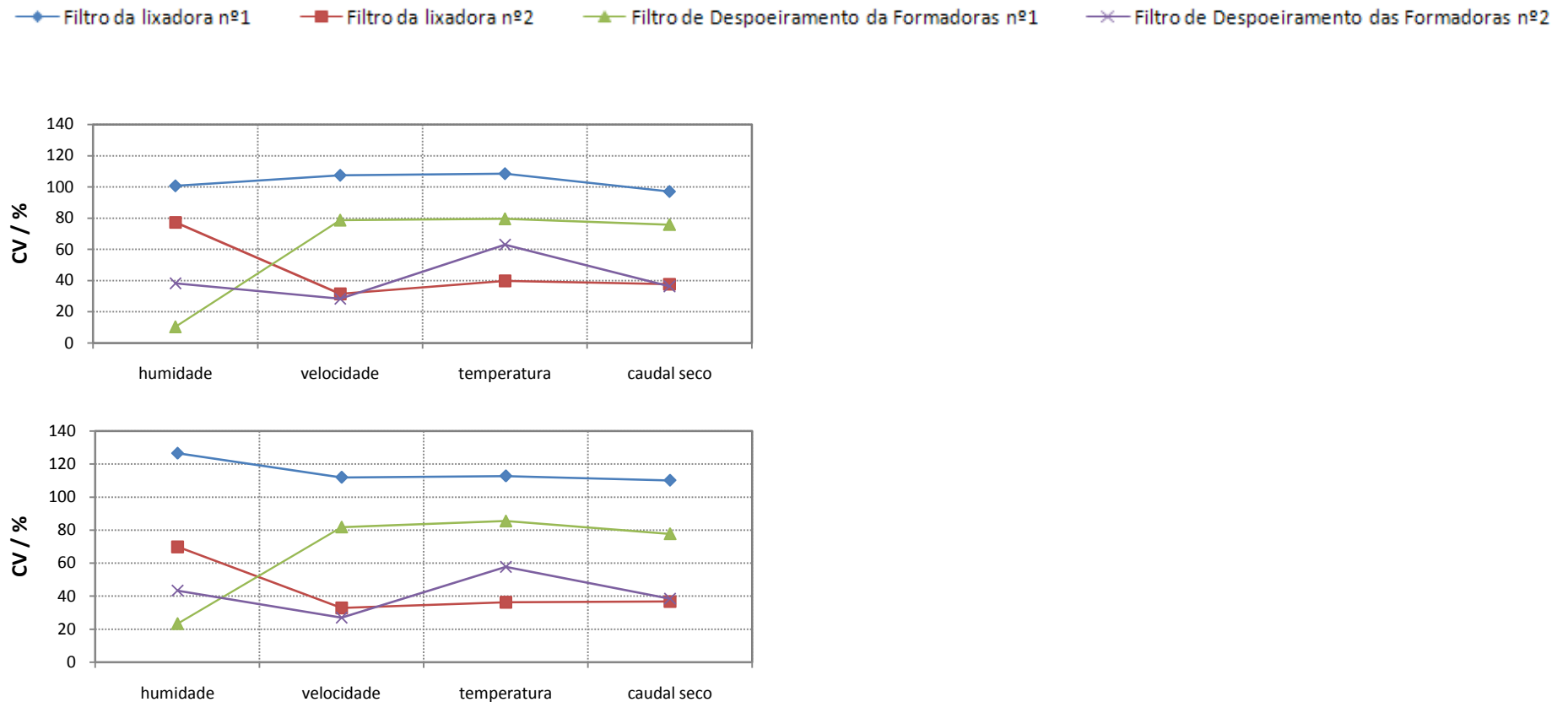
**Figura 25** - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de NO<sub>x</sub> para as diferentes instalações de combustão de Oliveira do Hospital.



**Figura 26** - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de COV, para as diferentes instalações de combustão de Oliveira do Hospital.



*Figura 27 - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de CO para as diferentes instalações de combustão de Oliveira do Hospital.*



**Figura 28** - Dependência do coeficiente de variância com os diferentes parâmetros de operação respeitantes à concentração (topo) e caudal mássico (base) de partículas para os diferentes filtros de despoeiramento de Oliveira do Hospital.

## Anexo V - Determinação do factor de emissão

Nesta secção está explicitado o procedimento geral para a determinação do factor de emissão específico por equipamento para os vários poluentes relevantes das operações da Sonae Indústria.

### Procedimento experimental

1. Subcontratar uma empresa especializada e devidamente credenciada, na análise de emissões de gases de exaustão, para efectuar as medições experimentais. Também se deve apurar, se a empresa tem a disponibilidade de realizar as medições das emissões dos diferentes poluentes num período de 1 a 2 dias, período previsto de realização experimental;
2. Durante cada ensaio experimental há necessidade de medir a concentração mássica ( $C_{mX}$ ) dos poluentes relevantes, nomeadamente de  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $COVs$ , partículas e metais pesados em  $mg \cdot Nm^{-3}$ . Em simultâneo deve ser registado os valores da temperatura ( $T$ ) e pressão ( $P$ ) de exaustão, da humidade absoluta ( $H$ ), do caudal volumétrico efectivo ( $Q$ ). Também, em simultâneo devem ser registados os valores do caudal mássico de madeira seca à saída do secador ( $Q_{madeira\ seca}$ ) ou caudal mássico de consumo de combustível ( $Q_{combustível}$ ) ou caudal volumétrico de painéis produzidos à saída da prensa ( $Q_{prensa}$ ), conforme a natureza do fenómeno em estudo: secagem ou combustão ou prensagem, respectivamente.
3. Repetir a alínea 2) para o número de amostras desejadas ( $n$ ) variando o ( $Q_{combustível}$ ) ou ( $Q_{madeira\ seca}$ ) ou ( $Q_{prensa}$ ) entre os limites mínimo ( $Q_{imin}$ ) e máximo ( $Q_{imax}$ ) de funcionamento. O incremento de variação ( $\Delta Q_i$ ) dever ser calculado pela equação V.1 :

$$\Delta Q_i = \frac{Q_{imax} - Q_{imin}}{n} \quad \text{Em que } i = \text{combustível, madeira seca, prensa} \quad (V.1)$$

Portanto, o valor de  $Q_{combustível}$  ou  $Q_{madeira\ seca}$  ou  $Q_{prensa}$  a ser usado no próximo ensaio experimental seria:

$$Q_{j+1} = Q_j + \Delta Q_i \quad \text{Em que } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (V.2)$$

Aconselha-se que o tamanho da amostra ( $n$ ) seja 25, pois o procedimento seria realizável em aproximadamente 2 dias e o tamanho de amostra é suficientemente elevado para produzir resultados com intervalo de confiança aceitáveis.

## Determinação do Factor de Emissão

Após realização dos  $n$  ensaios experimentais, os dados obtidos irão estar sujeitos a algumas operações matemáticas, com o objectivo de determinar o factor de emissão.

### Cálculo do caudal volumétrico seco em condições normais de pressão e de temperatura:

O caudal volumétrico seco em condições normais de pressão e de temperatura (PTN:  $T_{PTN}=273,15$  K e  $P_{PTN}=101,325$  kPa) ( $Q_{secoPTN}$ ) é determinado pela seguinte equação V.3.

$$Q_{secoPTNj} = Q_j \times \frac{T_{PTN}}{T_j} \times \frac{P_j}{P_{PTN}} \times \left(1 - \frac{H_j}{100}\right) \quad (V.3)$$

$Q_{secoPTNj}$	Caudal volumétrico seco em condições PTN do ensaio j	(Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
$Q_j$	Caudal volumétrico efectivo do ensaio j	(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
$T_j$	Temperatura do ensaio j	(K)
$P_j$	Pressão do ensaio j	(kPa)
$H_j$	Humidade absoluta do ensaio j	(%)

### Cálculo do caudal mássico de poluente X:

O caudal mássico do poluente X ( $Q_{mXj}$ ) é determinado aplicando a seguinte equação.

$$Q_{mXj} = C_{mXj} \times Q_{secoPTNj} \times 10^{-6} \quad (V.4)$$

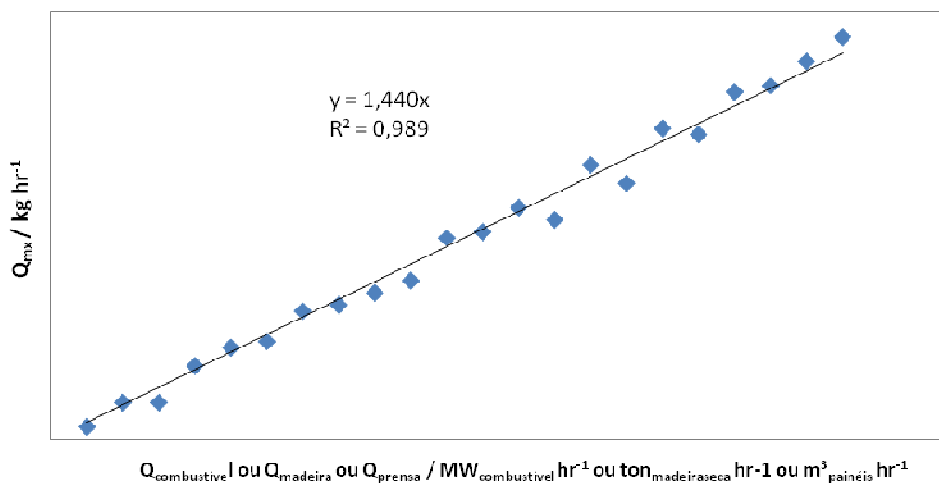
$Q_{secoPTNj}$	Caudal volumétrico seco em condições PTN do ensaio j	(Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
$Q_{mXj}$	Caudal mássico do poluente X do ensaio j	(kg·h <sup>-1</sup> )
$C_{mXj}$	Concentração mássica do poluente X do ensaio j	(mg·Nm <sup>-3</sup> )



Cálculo do factor de emissão do Poluente X:

Depois, da determinação do  $Q_{\text{em}} / \text{kg hr}^{-1}$  para os  $n$  ensaios, procede-se à representação gráfica dos  $Q_{\text{em}} / \text{kg hr}^{-1}$  com  $Q_{\text{combustive}} / \text{MW}_{\text{combustive}} \text{ hr}^{-1}$  ou  $Q_{\text{madeira}} / \text{ton}_{\text{madeiraseca}} \text{ hr}^{-1}$  ou  $Q_{\text{prensa}} / \text{m}^3_{\text{painéis}} \text{ hr}^{-1}$  se os fenómenos envolvidos nos equipamentos forem de combustão ou de secagem ou de prensagem, respectivamente. De seguida, procede-se à regressão linear dos pontos representados graficamente. A recta deve “atravessar” a origem (ver equação V.5). O valor obtido para o declive corresponde ao factor de emissão do poluente X (  $E_{\text{X}}$  expressos em  $\text{kg}_X \cdot \text{MW}_{\text{combustive}}^{-1}$  ou  $\text{kg}_X \cdot \text{ton}_{\text{madeiraseca}}^{-1}$  ou  $\text{kg}_X \cdot \text{m}^3_{\text{painéis}}^{-1}$  se o processo envolvente for de combustão ou de secagem ou de prensagem, respectivamente.

(V.5)



**Figura 29 - Esquema representativo da regressão linear para obtenção do factor de emissão**

Atendendo a Figura 22, verifica-se que os pontos experimentais são, optimamente, aproximáveis por uma regressão linear centrada na origem (coeficiente de correlação elevado). Contudo, nem todos os equipamentos a estudar podem apresentar comportamentos paralelos. Para casos, em que os pontos experimentais apresentarem comportamentos irregulares, sugere-se a realização da regressão a uma gama de valores do eixo do X, ou seja, deve-se efectuar uma translação horizontal (eixo do x) positiva, e posteriormente, realizar a mesma regressão. A escolha da gama deve ser cuidadosa e corresponder a uma gama de funcionamento habitual do equipamento a estudar.

## Anexo VI - Folha de Inventário de Emissões Atmosféricas



(sheet 1/2)

Facility	
Product	

year	
------	--

		Pollutants												
Cogeneration		CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM	VOCs	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn
Fuel type														
Quantity (MW)														
Emission Factor (kg <sub>pollutant</sub> MW <sup>-1</sup> <sub>fuel</sub> )														
Emission (ton <sub>pollutant</sub> )														

Boiler														
Fuel type														
Quantity														
Emission Factor (kg <sub>pollutant</sub> MW <sup>-1</sup> <sub>fuel</sub> )														
Emission (ton <sub>pollutant</sub> )														



(sheet 2/2)

Facility	
Product	

year	
------	--

		Pollutants												
Dryer		CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM	VOCs	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn
Dryer type														
Quantity (ton <sub>dry wood</sub> )														
Emission Factor (kg <sub>pollutant</sub> ton <sup>-1</sup> <sub>dry wood</sub> )														
Emission (ton <sub>pollutant</sub> )														

Press														
Quantity (m <sup>3</sup> <sub>produced panels</sub> )														
Emission Factor (kg <sub>pollutant</sub> m <sup>3</sup> <sub>produced panels</sub> )														
Emission (ton <sub>pollutant</sub> )														

Total														
-------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

## Anexo VII - Regressões lineares uni-variável desenvolvidas para os focos de emissão estacionários das unidades fabris de Oliveira do Hospital e de Mangualde

Tabela 17 - Regressões lineares desenvolvidas para o motor de cogeração (MC) e caldeiras da 1ª (C1) e 2ª linhas de produção (C2). Os elementos da 1ª linha e da 1ª coluna correspondem à variável independente (x) e variável dependente (y), respectivamente.

Poluentes			T / °C	P / kPa	O <sub>2</sub> / %	H / %	v / m s <sup>-1</sup>	Q <sub>c</sub> / Nm <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup>
MP	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	C1	y=0,243x+68,1	y=-2,84x+380	y=-3,93x+160	y=-11,7x+130	y=5,70x+46,0	y=-2,76*10 <sup>-3</sup> x+196
		C2	y=0,293x+21,6	y=-2,96x+382	y=-21,7x+434	y=10,2x+67,0	y=-1,54x+112	y=-9,91*10 <sup>-4</sup> x+131
		MC	y=1,51x-332	y=-5,22x+620	y=45,8x-534	y=-56,4x+250	y=3,58x-2,81	y=2,07*10 <sup>-3</sup> x+9,46
	Q <sub>m</sub> / kg hr <sup>-1</sup>	C1	y=2,34*10 <sup>-3</sup> x+3,04	y=0,270x-22,7	y=-7,53*10 <sup>-2</sup> x+4,45	y=3,13*10 <sup>-2</sup> x+3,33	y=0,224x+1,06	y=1,62*10 <sup>-5</sup> x+2,87
		C2	y=2,10*10 <sup>-4</sup> x+3,28	y=-0,426x+44,6	y=0,742x-8,39	y=-0,265x+3,95	y=0,241x+0,502	y=5,05*10 <sup>-5</sup> x+1,40
		MC	y=5,28*10 <sup>-2</sup> x-9,90	y=1,15x-105	y=3,07x-37,4	Y=-3,69x+15,1	Y=0,296x-3,57	y=1,82*10 <sup>-4</sup> x-3,07
CO	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	C1	y=-0,144x+134	y=-3,16x+418	y=28,6x-287	y=-48,2x+213	y=-8,58x+201	y=6,87*10 <sup>-4</sup> x+89,1
		C2	y=-0,977x+431	y=-34,5x+3534	y=44,5x-509	y=-39,8x+296	y=10,3x+70,3	y=4,36*10 <sup>-3</sup> x+29,7
		MC	y=-7,74*10 <sup>-2</sup> x+109	y=0,603x+28,4	y=-1x+100	y=14,1x+50,8	y=-0,861x+113	y=-5,50*10 <sup>-4</sup> x+113
	Q <sub>m</sub> / kg hr <sup>-1</sup>	C1	y=-9,59*10 <sup>-3</sup> x+5,15	y=0,344x-29,6	y=0,938x-9,41	y=-0,961x+5,69	y=-0,135x+5,08	y=1,40*10 <sup>-4</sup> x-0,916
		C2	y=-6,85*10 <sup>-2</sup> x+24,7	y=-1,80x+182	y=1,95x-23,0	y=-2,24x+13,6	y=0,693x-0,308	y=2,87*10 <sup>-4</sup> x-3,26
		MC	y=3,45*10 <sup>-3</sup> x+2,95	y=0,327x-27,5	y=0,612x-4,67	y=-0,160x+4,38	y=0,102x+0,828	y=6,39*10 <sup>-5</sup> x+0,944
SO <sub>2</sub>	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	C1	y=-6,51*10 <sup>-3</sup> x+11,5	y=9,39x-898	y=-6,61*10 <sup>-2</sup> x+11,4	y=12,7x-16,1	y=5,41x-46,1	y=1,37*10 <sup>-3</sup> x-34,3
		C2	y=5,43*10 <sup>-2</sup> x-3,55	y=3,26x-306	y=0,810x-2,65	y=1,27x+6,54	y=-1,59x+28,0	y=4,53*10 <sup>-4</sup> x+26,3
		MC	y=1,80x-325	y=-136x+13292	y=-64,1x+1095	y=105x-66,8	y=5,97x+13,9	y=3,41*10 <sup>-3</sup> x+36,6
	Q <sub>m</sub> / kg hr <sup>-1</sup>	C1	y=-7,66*10 <sup>-4</sup> x+0,496	y=0,378x-36,0	y=3,88*10 <sup>-3</sup> x+0,314	y=0,472x-0,624	y=0,212x-1,84	y=6,35*10 <sup>-5</sup> x-1,70
		C2	y=9,12*10 <sup>-4</sup> x+0,039	y=3,82*10 <sup>-2</sup> x-3,44	y=0,113x-1,49	y=-7,37*10 <sup>-3</sup> x+0,296	y=-1,48*10 <sup>-2</sup> x+0,444	y=-5,19*10 <sup>-6</sup> x+0,463
		MC	y=3,09*10 <sup>-2</sup> x+1,14	y=-5,21x+512	y=-3,11x+53,6	y=6,22x-5,51	y=0,533x-6,35	y=3,28*10 <sup>-4</sup> x-5,41

Tabela 17 - continuação

Poluentes			T/ °C	P / kPa	O <sub>2</sub> / %	H / %	v / m s <sup>-1</sup>	Q <sub>e</sub> / Nm <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup>
NO <sub>x</sub>	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	C1	y=0,406x+380	y=21,0x-1585	y=-51,4x+1159	y=-18,0x+480	y=8,48x+354	y=-3,64*10 <sup>-3</sup> x+561
		C2	y=-0,272x+568	y=16,1x-1068	y=-139x+2675	y=32,3x+412	y=-18,9x+713	y=3,32*10 <sup>-3</sup> x+620
		MC	y=4,57x+318	y=-462x+46135	y=-339x+6392	y=20,4x+1597	y=14,6x+1197	y=-8,65*10 <sup>-3</sup> x+1237
	Q <sub>m</sub> / kg hr <sup>-1</sup>	C1	y=-8,9*10 <sup>-3</sup> x+15,7	y=2,29x-208	y=-1,46x+34,7	Y=1,16x+11,9	Y=0,628x+7,79	y=3,46*10 <sup>-4</sup> x+3,06
		C2	y=-8,66*10 <sup>-2</sup> x+38,1	y=-1,96x+208	y=1,94*10 <sup>-2</sup> x+17,1	Y=-1,93x+22,7	Y=1,01x+5,96	y=4,06*10 <sup>-4</sup> x+2,78
		MC	y=0,798x-172	y=3,95x-319	y=25,6x-298	Y=-57,0x+204	Y=0,540x+43,9	y=2,69*10 <sup>-4</sup> x+47,8
COT	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	C1	y=-6,5*10 <sup>-3</sup> x+7,85	y=-9,18*10 <sup>-2</sup> x+15,7	y=0,192x+4,17	y=-0,570x+8,05	y=-0,267x+9,64	y=5,28*10 <sup>-5</sup> x+5,13
		C2	y=-2,57*10 <sup>-3</sup> x+8,26	y=-0,106x+17,9	y=6,78*10 <sup>-2</sup> x+6,54	y=-6,87*10 <sup>-2</sup> x+7,79	y=8,81*10 <sup>-2</sup> x+6,60	y=2,43*10 <sup>-5</sup> x+6,73
		MC	y=0,122x-23,4	y=1,65x-147	y=5,05x-58,7	y=-8,36x+33,12	y=-6,47*10 <sup>-3</sup> x+12,2	y=-1,62*10 <sup>-5</sup> x+12,8
	Q <sub>m</sub> / kg hr <sup>-1</sup>	C1	y=-1,89*10 <sup>-4</sup> x+0,215	y=-3,06*10 <sup>-2</sup> x+3,15	y=2,37*10 <sup>-3</sup> x+0,157	y=-0,104x+0,410	y=1,42*10 <sup>-2</sup> x+0,045	y=8,24*10 <sup>-6</sup> x-0,046
		C2	y=-1,11*10 <sup>-3</sup> x+0,56	y=-3,89*10 <sup>-2</sup> x+4,05	y=8,87*10 <sup>-3</sup> x-1,12	y=-4,68*10 <sup>-2</sup> x+0,409	y=2,9*10 <sup>-2</sup> x-0,052	y=8,61*10 <sup>-6</sup> x-0,034
		MC	y=6,89*10 <sup>-4</sup> x+0,517	y=0,187x-17,3	y=0,229x-2,50	y=-0,328x+1,53	y=3,29*10 <sup>-2</sup> x-0,312	y=2,10*10 <sup>-5</sup> x-0,293
CO <sub>2</sub>	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	C1	y=96,6x+99560	y=-9963x+1078691	y=-17206x+354456	y=8030x+97573	y=-1866x+133936	y=-2,17x+185095
		C2	y=-33,3x+95426	y=-4836x+556738	y=-12418x+281323	y=1991x+81645	y=1718x+67693	y=0,427x+71719
		MC	y=-50,6x+109761	y=-16318x+1665693	y=-18712x+356993	y=9778x+70384	y=270x+86649	y=0,177x+86602
	Q <sub>m</sub> / kg hr <sup>-1</sup>	C1	y=-2,03x+4343	y=50,1x-817	y=-535x+11493	y=583x+2807	y=10,2x+3924	y=3,68*10 <sup>-2</sup> x+2831
		C2	y=-14,4x+7113	y=-566x+58467	y=764x-8439	y=-533x+4967	y=378x-767	y=0,111x-497
		MC	y=-8,37x+7408	y=-38,6x+8684	y=-169x+7328	y=-233x+5557	y=171x-338	y=0,110x-276

**Tabela 18 - Regressões lineares desenvolvidas para os 1º e 2º estágios do secador da 1ª linha de produção (S1E1 e S1E2) e secadores sifter norte e sifter sul da 2ª linha de produção (S2SN e S2SS). Os elementos da 1ª linha e da 1ª coluna correspondem à variável independente (x) e variável dependente (y), respectivamente.**

Poluentes			T / °C	P / kPa	H / %	v / m s <sup>-1</sup>	Q <sub>s</sub> / Nm <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup>
MP	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	S1E1	y=0,641x-35,2	y=2,12x-197	y=6,21x-2,58	y=-0,857x+17,9	y=-6,53*10 <sup>-5</sup> x+17,9
		S1E2	y=-0,409x+30,5	y=3,00x-278	y=-0,607x+10,7	y=0,576x+4,14	y=1,31*10 <sup>-4</sup> x+3,46
		S2SN	y=0,160x-0,843	y=-0,110x+21,1	y=0,595x+9,18	y=0,332x+7,23	y=2,34*10 <sup>-5</sup> x+7,53
		S2SS	y=-0,112x+17,3	y=0,860x-73,0	y=0,966x+7,68	y=5,46*10 <sup>-2</sup> x+9,27	y=3,75*10 <sup>-6</sup> x+9,32
	Q <sub>m</sub> / kg hr <sup>-1</sup>	S1E1	y=2,58*10 <sup>-2</sup> x-0,737	y=5,9*10 <sup>-2</sup> x-4,68	y=-1,9*10 <sup>-3</sup> x+1,04	y=1,68*10 <sup>-2</sup> x+0,871	y=1,36*10 <sup>-6</sup> x+0,860
		S1E2	y=-3,4*10 <sup>-2</sup> x+2,19	y=0,127x-11,7	y=-6,84*10 <sup>-2</sup> x+0,581	Y=0,0716x-0,218	y=1,44*10 <sup>-5</sup> x-0,218
		S2SN	y=4,31*10 <sup>-2</sup> x-1,69	y=-0,324x+32,5	y=0,175x+0,986	y=0,171x-0,308	y=1,33*10 <sup>-5</sup> x-0,323
		S2SS	y=-3,62*10 <sup>-2</sup> x+3,79	y=4,9*10 <sup>-2</sup> x-3,35	y=1,5*10 <sup>-3</sup> x+1,37	y=0,117x+0,142	y=8,59*10 <sup>-6</sup> x+0,178
CO	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	S1E1	y=-5,18x+391	y=1,81x-142	y=-17,1x+66,0	y=-1,32x+47,9	y=-8,03*10 <sup>-5</sup> x+45,3
		S1E2	y=0,124x+0,63	y=6,05x-573	y=1,40x+4,06	y=-1,41x+19,9	y=-2,22*10 <sup>-4</sup> x+17,1
		S2SN	y=-7,99x+703	y=-40,6x+4037	y=-32,8x+208	y=-2,19x+156	y=8,33*10 <sup>-5</sup> x+124
		S2SS	y=4,15x-154	y=-12,9x+1362	y=-14,7x+156	y=-17,0x+302	y=-1,22*10 <sup>-3</sup> x+293
	Q <sub>m</sub> / kg hr <sup>-1</sup>	S1E1	y=-0,678x+51,2	y=8,96*10 <sup>-2</sup> x-4,21	y=-2,87x+9,82	y=8,04*10 <sup>-2</sup> x+5,31	y=-3,58*10 <sup>-6</sup> x+4,96
		S1E2	y=-9,8*10 <sup>-3</sup> x+0,812	y=0,254x-24,0	y=7,6*10 <sup>-3</sup> x+0,290	y=2,28*10 <sup>-2</sup> x+0,515	y=-2,30*10 <sup>-6</sup> x+0,411
		S2SN	y=-1,13x+97,7	y=-9,19x+901	y=-5,16x+29,0	y=0,602x+11,4	y=9,12*10 <sup>-5</sup> x+5,69
		S2SS	y=0,300x-5,977	y=-2,04x+210	y=-4,82x+24,9	y=-0,222x+16,4	y=-1,20*10 <sup>-5</sup> x+15,7
NO <sub>x</sub>	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	S1E1	y=2,17x+0,014	y=15,0x-1302	y=22,6x+108	y=-4,62x+198	y=-3,39*10 <sup>-4</sup> x+196
		S1E2	y=0,342x-2,46	y=-2,58*10 <sup>-2</sup> x-17,7	y=0,834x+13,5	y=-0,556x+20,3	y=-9,38*10 <sup>-5</sup> x+19,7
		S2SN	y=-2,14x+312	y=-9,90x+1111	y=-0,269x+160	y=-4,95x+208	y=-3,64*10 <sup>-4</sup> x+206

Tabela 18 - continuação

Poluentes		T/ °C	P / kPa	H / %	v / m s <sup>-1</sup>	Q <sub>s</sub> / Nm <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup>	
NO <sub>x</sub>	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	S2SS	y=5,52x-215	y=60,5x-5681	y=12,7x+125	y=-12,679x+287	y=-9,49*10 <sup>-4</sup> x+286
		S1E1	y=-0,308x+40,9	y=-0,791x+96,3	y=-8,23x+34,9	y=1,26x+6,50	y=9,88*10 <sup>-5</sup> x+6,03
		S1E2	y=-1,8*10 <sup>-2</sup> x+1,61	y=-5,32*10 <sup>-2</sup> x+5,78	y=-7,05*10 <sup>-2</sup> x+0,830	y=7,47*10 <sup>-2</sup> x-2,7*10 <sup>-3</sup>	y=1,42*10 <sup>-5</sup> x+0,036
		S2SN	y=9,7*10 <sup>-2</sup> x+26,4	y=-7,21x+713	y=0,563x+18,3	y=1,15x+8,20	y=1,02*10 <sup>-4</sup> x+6,55
		S2SS	y=0,331x-7,10	y=-1,31x+141	y=-4,70x+25,5	y=0,111x+13,8	y=1,10*10 <sup>-5</sup> x+13,5
CO <sub>T</sub>	Q <sub>m</sub> / kg hr <sup>-1</sup>	S1E1	y=0,443x-22,0	y=1,33x-121	y=4,58x+7,1*10 <sup>-3</sup>	y=-0,647x+15,3	y=-4,98*10 <sup>-5</sup> x+15,3
		S1E2	y=0,674x-26,8	y=1,57x-142	y=3,06x+1,28	y=-1,76x+24,1	y=-3,34*10 <sup>-4</sup> x+23,2
		S2SN	y=-0,115x+15,4	y=-0,810x+85,0	y=-0,177x+7,56	y=-0,193x+9,07	y=-1,31*10 <sup>-5</sup> x+8,84
		S2SS	y=-9,44*10 <sup>-2</sup> x+12,5	y=-2,28x+226	y=0,113x+5,95	y=-0,243x+8,76	y=-1,68*10 <sup>-5</sup> x+8,54
	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	S1E1	y=1,68*10 <sup>-2</sup> x-0,134	y=-1,88*10 <sup>-3</sup> x+1,22	y=-0,115x+1,24	y=3,01*10 <sup>-2</sup> x+0,711	y=2,31*10 <sup>-6</sup> x+0,707
		S1E2	y=1,07*10 <sup>-2</sup> x-0,215	y=4,24*10 <sup>-2</sup> x-3,73	y=-6,83*10 <sup>-2</sup> x+0,195	y=-2,28*10 <sup>-2</sup> x+0,548	y=-4,51*10 <sup>-6</sup> x+0,545
		S2SN	y=-6,9*10 <sup>-3</sup> x+1,37	y=-0,356x+35,1	y=-08,3*10 <sup>-3</sup> x+0,857	y=5,04*10 <sup>-2</sup> x+0,377	y=4,56*10 <sup>-6</sup> x+0,292
		S2SS	y=-2,36*10 <sup>-2</sup> x+2,40	y=-0,303x+30,0	y=-0,122x+1,10	y=6,45*10 <sup>-2</sup> x+0,147	y=4,87*10 <sup>-6</sup> x+0,148
CO <sub>2</sub>	Q <sub>m</sub> / kg hr <sup>-1</sup>	S1E1	y=-3331x+265195	y=-6563x+671999	y=-8200x+50601	y=971x+25809	y=6,92*10 <sup>-2</sup> x+25861
		S1E2	y=32,3x+236	y=72,5x-5042	y=987x-85,4	y=249x-367	y=3,11*10 <sup>-4</sup> x+492
		S2SN	y=-1668x+145543	y=-12073x+1187503	y=-2377x+32141	y=461x+22208	y=9,31*10 <sup>-2</sup> x+14856
		S2SS	y=-1560x+129777	y=-37362x+3625827	y=-9,75x+25525	y=-2719x+54149	y=-0,184x+51133
	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	S1E1	y=-419x+34425	y=-1184x+120333	y=-3708x+12397	y=599x-730	Y=4,61*10 <sup>-2</sup> x-826
		S1E2	y=-2,81x+242	y=-2,97x+381	y=44,1x+3,11	y=26,8x-148	Y=4,1*10 <sup>-3</sup> x-91,5
		S2SN	y=-271x+23277	y=-1851x+181901	y=-729x+5612	y=116x+2814	Y=19*10 <sup>-2</sup> x+1529
		S2SS	y=-246x+19804	y=-4880x+437608	y=-1024x+5671	y=191x+1363	Y=1,63*10 <sup>-2</sup> x+1113



**Tabela 19** - Regressões lineares desenvolvidas para as seis chaminés de exaustão da 1ª linha de produção (P1C1, P1C2, P1C3, P1C4, P1C5 e P1C6) e duas chaminés de exaustão da 2ª linha de produção (P2E e P2S). Os elementos da 1ª linha e da 1ª coluna correspondem à variável independente (x) e variável dependente (y), respectivamente.

Poluentes		T / °C	P / kPa	H / %	v / m·s <sup>-1</sup>	Q <sub>s</sub> / Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	
MP	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	P1C1	$y = 0,440x - 7,60$	$y = 0,678x - 56,6$	$y = 4,43x + 5,88 \cdot 10^{-3}$	$y = -1,15x + 20,0$	$y = -5,81 \cdot 10^{-4}x + 19,5$
		P1C2	$y = 0,207x - 0,593$	$y = 4,31x - 406$	$y = 1,29x + 5,17$	$y = -1,78x + 25,7$	$y = -6,72 \cdot 10^{-4}x + 20,7$
		P1C3	$y = 0,369x - 6,45$	$y = 2,05x - 190$	$y = 12,5x - 12,2$	$y = 0,610x + 1,25$	$y = 3,32 \cdot 10^{-4}x + 1,17$
		P1C4	$y = 0,912x - 24,5$	$y = 1,36x - 124$	$y = 16,7x - 16,8$	$y = -0,217x + 8,92$	$y = -1,56 \cdot 10^{-4}x + 9,94$
		P1C5	$y = 0,548x - 10,3$	$y = 0,0318x + 2,42$	$y = 7,18x - 5,70$	$y = -0,240x + 8,86$	$y = -1,66 \cdot 10^{-4}x + 9,99$
		P1C6	$y = 0,215x + 0,917$	$y = 2,62x - 245$	$y = 9,02x - 7,05$	$y = -1,33x + 29,2$	$y = -9,8 \cdot 10^{-4}x + 38,8$
		P2E	$y = -0,251x + 38,5$	$y = -0,808x + 104$	$y = -10,4x + 41,0$	$y = -10,6x + 76,5$	$y = -5,49 \cdot 10^{-3}x + 85,0$
	P2S	$y = -2,69x + 184$	$y = -4,21x + 434$	$y = -31,8x + 74,3$	$y = -0,0619x + 24,5$	$y = 2,07 \cdot 10^{-4}x + 21,2$	
	Q <sub>m</sub> / kg hr <sup>-1</sup>	P1C1	$y = 3,4 \cdot 10^{-3}x - 1,3 \cdot 10^{-3}$	$y = 0,0359x - 3,34$	$y = -0,0743x + 0,241$	$y = 2,09 \cdot 10^{-3}x + 0,0935$	$y = 8,07 \cdot 10^{-7}x + 0,098$
		P1C2	$y = 5,6 \cdot 10^{-3}x - 7,96 \cdot 10^{-2}$	$y = 0,0484x - 4,52$	$y = 0,0635x + 0,03$	$y = -0,014x + 0,279$	$y = -1,29 \cdot 10^{-6}x + 0,160$
		P1C3	$y = 1,36 \cdot 10^{-2}x - 0,358$	$y = 0,0184x - 1,61$	$y = 0,414x - 0,497$	$y = 0,0337x - 0,188$	$y = 1,91 \cdot 10^{-5}x - 0,206$
		P1C4	$y = 0,0187x - 0,490$	$y = 0,0322x - 2,96$	$y = 0,333x - 0,320$	$y = -2,87 \cdot 10^{-4}x + 0,144$	$y = -1,15 \cdot 10^{-6}x + 0,167$
		P1C5	$y = 0,0103x - 0,152$	$y = 2,0 \cdot 10^{-4}x - 0,0471$	$y = 0,159x - 0,103$	$y = 1,87 \cdot 10^{-4}x + 0,141$	$y = -1,03 \cdot 10^{-6}x + 0,172$
		P1C6	$y = 8,4 \cdot 10^{-3}x - 0,0167$	$y = 0,0706x - 6,57$	$y = 0,257x - 0,179$	$y = -0,0241x + 0,622$	$y = -2,18 \cdot 10^{-5}x + 0,929$
P2E		$y = 4,8 \cdot 10^{-3}x + 0,519$	$y = -8,1 \cdot 10^{-3}x + 1,06$	$y = -8,75 \cdot 10^{-2}x + 0,401$	$y = -0,0682x + 0,600$	$y = -3,46 \cdot 10^{-5}x + 0,646$	
P2S	$y = -3,98 \cdot 10^{-2}x + 2,72$	$y = -0,0561x + 5,82$	$y = -0,432x + 1,03$	$y = 0,0425x + 0,0669$	$y = 2,32 \cdot 10^{-5}x + 0,0136$		

Tabela 19 - continuação

Poluentes		T/ °C	P / kPa	H / %	v / m s <sup>-1</sup>	Q <sub>s</sub> / Nm <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup>	
COT	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	P1C1	y=0,110x+2,71	y=0,146x-7,51	y=1,75x+3,53	y=-0,353x+10,3	y=-1,77*10 <sup>-4</sup> x+10,4
		P1C2	y=0,261x-4,54	y=-0,549*x+58,1	y=-2,08x+8,82	y=0,184x+3,50	y=1,24*10 <sup>-4</sup> x+2,93
		P1C3	y=0,101x+2,14	y=-0,152x+20,5	y=1,91x+2,93	y=0,133x+4,58	y=6,91*10 <sup>-4</sup> x+4,62
		P1C4	y=0,396x-7,64	y=-0,327x+37,1	y=3,37x+1,03	y=-0,0498x+6,30	y=-4,39*10 <sup>-5</sup> x+6,72
		P1C5	y=0,140x+1,09	y=-0,611x+64,2	y=0,520x+4,31	y=-0,0439x+5,73	y=-3,19*10 <sup>-5</sup> x+5,98
		P1C6	y=0,207x-0,138	y=0,0495x+0,980	y=0,334x+5,22	y=0,924x-9,64	y=3,92*10 <sup>-4</sup> x-6,99
		P2E	y=-0,381x+26,9	y=-0,732x+78,3	y=-5,31x+15,0	y=-2,53x+19,3	y=-1,31*10 <sup>-3</sup> x+21,3
		P2S	y=-0,204x+18,8	y=-0,821x+86,6	y=-1,18x+8,43	y=0,415x+3,86	y=1,62*10 <sup>-4</sup> x+4,25
	Q <sub>m</sub> / kg hr <sup>-1</sup>	P1C1	y=-2,2*10 <sup>-3</sup> x+0,198	y=0,0231x-2,09	y=-0,0348x+0,181	y=8,8*10 <sup>-3</sup> x+0,0268	y=4,43*10 <sup>-6</sup> x+0,0306
		P1C2	y=6,1*10 <sup>-3</sup> x-0,123	y=-0,0339x+3,37	y=-0,0275x+0,156	y=0,016x-0,0551	y=9,13*10 <sup>-6</sup> x-0,0717
		P1C3	y=5,7*10 <sup>-3</sup> x-0,0995	y=-0,0110x+1,08	y=0,139x-0,103	y=0,0149x-0,0362	y=8,50*10 <sup>-6</sup> x-0,0451
		P1C4	y=5,1*10 <sup>-3</sup> x-0,0398	y=-0,0151x+1,59	y=0,0439x+0,059	y=0,0084x+0,0292	y=3,87*10 <sup>-6</sup> x+0,0413
		P1C5	y=-2,0*10 <sup>-4</sup> x+0,144	y=-0,0142x+1,51	y=-5,3*10 <sup>-3</sup> x+0,146	y=0,0101x-3,4*10 <sup>-3</sup>	y=4,62*10 <sup>-6</sup> x+0,0123
		P1C6	y=6,9*10 <sup>-3</sup> x-0,0107	y=-8,2*10 <sup>-3</sup> x+0,973	y=-4,9*10 <sup>-3</sup> x+0,196	y=0,0392x-0,464	y=1,739*10 <sup>-5</sup> x-0,376
P2E		y=0,0154x-0,644	y=-0,0402x+4,08	y=0,219x-0,165	y=0,251x-1,05	y=9,55*10 <sup>-5</sup> x-0,876	
P2S		y=-2,5*10 <sup>-3</sup> x+0,244	y=-0,0104x+1,11	y=3,3*10 <sup>-3</sup> x+0,0904	y=0,0209x-0,0415	y=9,10*10 <sup>-6</sup> x-0,0348	

Tabela 20 -Regressões lineares desenvolvidas para o WESP (W) e caldeira (C). Os elementos da 1ª linha e da 1ª coluna correspondem à variável independente (x) e variável dependente (y), respectivamente

Poluentes			H / %	v / m s <sup>-1</sup>	T/ °C	Q <sub>s</sub> / Nm <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup>	O <sub>2</sub> / %
MP	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	W	y=1,11x+6,74	y=-2,46x+39,8	y=0,167x+2,41	y=-9,46*10 <sup>-5</sup> x+41,0	y=-2,85x+64,8
		C	y=24,3x-14,1	y=-1,38x+61,4	y=-0,719x+215	y=-1,12*10 <sup>-3</sup> x+61,5	y=-5,72x+132
	Q <sub>m</sub> / kg hr <sup>-1</sup>	W	y=0,168x+2,83	y=-0,135x+5,30	y=0,0917x-2,30	y=-1,07*10 <sup>-5</sup> x+6,98	y=-0,4736x+12,4
		C	y=-0,299x+1,30	y=0,0277x+0,248	y=3,7*10 <sup>-3</sup> x-0,325	y=2,29*10 <sup>-5</sup> x+0,241	Y=0,0477x-0,159
SO <sub>2</sub>	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	W	y=-0,101x+6,95	y=5,112x-48,0	y=1,73x-110	y=7,43*10 <sup>-5</sup> x-15,2	y=-2,54x+51,9
		C	y=2,41x+0,990	y=-0,664x+14,4	y=0,180x-35,5	y=-5,59*10 <sup>-4</sup> x+14,7	y=0,554x-1,42
	Q <sub>m</sub> / kg hr <sup>-1</sup>	W	y=-0,0576x+2,24	y=1,66x-15,7	y=0,534x-34,1	y=2,56*10 <sup>-5</sup> x-5,52	y=-0,714x+14,7
		C	y=5,3*10 <sup>-3</sup> x+0,0446	y=-3,8*10 <sup>-3</sup> x+0,101	y=1,5*10 <sup>-3</sup> x-0,303	y=-3,25*10 <sup>-6</sup> x+0,103	y=6,28*10 <sup>-3</sup> x-0,0370
NO <sub>x</sub>	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	W	y=3,19x+79,0	y=-12,2x+229	y=-0,840x+155	y=-3,51*10 <sup>-4</sup> x+201	y=-7,95x+241
		C	y=27,6x+78,6	y=-2,16x+171	y=-0,533x+272	y=-1,78*10 <sup>-3</sup> x+171	y=-5,23x+226
	Q <sub>m</sub> / kg hr <sup>-1</sup>	W	y=-0,108x+29,0	y=0,182x+26,4	y=6,3*10 <sup>-3</sup> x+27,9	y=7,54*10 <sup>-6</sup> x+26,2	Y=0,0833x+26,8
		C	y=-1,76x+6,26	y=0,136x+0,389	y=0,0351x-6,36	y=1,12*10 <sup>-4</sup> x+0,362	Y=0,339x-3,19
COV	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	W	y=0,396x+14,9	y=-1,22x+30,3	y=-0,0331x+19,6	y=-3,89*10 <sup>-4</sup> x+28,7	y=-0,973x+34,8
		C	y=1,60x+6,688	y=-0,354x+14,6	y=0,0778x-7,74	y=-2,97*10 <sup>-4</sup> x+14,8	y=0,182x+7,89
	Q <sub>m</sub> / kg hr <sup>-1</sup>	W	y=-0,0598x+5,37	y=0,282x+2,01	y=0,0338x+2,74	Y=7,32*10 <sup>-6</sup> x+2,88	y=0,123x+2,79
		C	y=-0,104x+0,384	y=6,4*10 <sup>-3</sup> x+0,0559	y=2,9*10 <sup>-3</sup> x-0,553	Y=5,17*10 <sup>-6</sup> x+0,0553	y=0,0237x-0,230
CO	C <sub>m</sub> / mg Nm <sup>-3</sup>	W	y=-2,32x+47,3	y=10,7x-80,3	y=-0,325x+54,8	y=3,12*10 <sup>-4</sup> x-57,6	y=12,9x-198
		C	y=-20,4x+70,2	y=1,07x+7,94	y=0,646x-132	y=8,66*10 <sup>-4</sup> x+7,93	y=4,99x-55,3
	Q <sub>m</sub> / kg hr <sup>-1</sup>	W	y=-0,901x+15,3	y=3,94x-32,1	y=-0,0559x+13,5	y=1,16*10 <sup>-4</sup> x-23,7	y=4,39x-69,0
		C	y=-0,665x+1,98	y=0,0462x-0,181	y=0,0157x-3,36	y=3,78*10 <sup>-4</sup> x-0,188	y=0,139x-1,75

**Tabela 21 - Regressões lineares desenvolvidas para os filtros de despoeiramento nº1 e nº2 da lixadora (FL1 e FL2) e da formadora (FF1 e FF2). Os elementos da 1ª linha e da 1ª coluna correspondem à variável independente (x) e variável dependente (y), respectivamente.**

Poluentes			H / %	v / m s <sup>-1</sup>	T/ °C	Q <sub>s</sub> / Nm <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup>
MP	C / mg Nm <sup>-3</sup>	FL1	y=7,29x+0,226	y=-0,748x+20,7	y=-0,483x+24,0	y=-2,9*10 <sup>-3</sup> x+27,2
		FL2	y=-5,35x+13,7	y=-1,38x+21,5	y=-5,9*10 <sup>-3</sup> x+5,12	y=-1,52*10 <sup>-4</sup> x+13,23
		FF1	y=-7,45x+21,2	y=0,280x+3,25	y=-0,0435x+10,3	y=2,10*10 <sup>-4</sup> x-2,76
		FF2	y=33,9x-52,6	y=-7,19x+95,7	y=0,192x+5,74	y=-2,09*10 <sup>-3</sup> x+67,2
	C <sub>m</sub> / kg hr <sup>-1</sup>	FL1	y=0,625x-0,416	y=-0,0196x+0,805	y=-2,9*10 <sup>-3</sup> x+0,606	y=-6,94*10 <sup>-6</sup> x+0,934
		FL2	y=-0,438x+0,966	y=-0,0516x+0,881	y=-2,3*10 <sup>-3</sup> x+0,332	y=-1,13*10 <sup>-6</sup> x+0,335
		FF1	y=-0,376x+1,09	y=0,0278x-0,0499	y=-5,17*10 <sup>-4</sup> x+0,514	y=1,678*10 <sup>-5</sup> x-0,425
		FF2	y=0,629x-0,918	y=-0,136x+1,88	y=2,3*10 <sup>-3</sup> x+0,236	y=-3,62*10 <sup>-5</sup> x+1,26