



**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA De LISBOA**  
**ÁREA DEPARTAMENTAL DE ENGENHARIA QUÍMICA**



## Análise do sistema de tratamento de efluentes gasosos de uma Central de Valorização Energética de Resíduos Sólidos Urbanos

**SAMIRA GOMES FURTADO**  
(Licenciada em Engenharia Química)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química e  
Biológica – ramo de Processos Químicos

**Orientadores:**

Prof. Mestre Feliz José Mil-Homem dos Santos  
Eng.º Rui Jorge Ribeiro Laia

**Júri:**

Presidente: Prof. Doutor Jaime Filipe Borges Puna

**Vogais:**

Prof. Doutor João Fernando Pereira Gomes  
Prof.ª Doutora Maria Teresa dos santos  
Eng.º Rui Jorge Ribeiro Laia

**Dezembro de 2014**



## **Agradecimentos**

Ao meu orientador Prof. Mestre Feliz José Mil-Homens dos Santos.

Ao meu orientador Engenheiro Rui Jorge Ribeiro Laia.

À Empresa Valorsul e os seus colaboradores.

Ao Prof. Mestre Rui Filipe.

À minha família.

Aos meus amigos e colegas, principalmente os que ajudaram-me na revisão da presente dissertação e fizeram parte deste meu longo percurso académico.

À dona Emília e filhos.

Um muito obrigado.



## Resumo

O sistema de tratamento dos gases formados durante a combustão de Resíduos Sólidos Urbanos, (RSU), é um dos componentes mais importantes de uma instalação de incineração. O seu controlo e optimização asseguram a redução dos gases nocivos formados para valores que não representam quaisquer perigos para a saúde pública e ambiental, o que leva a incineração a ser considerada uma das técnicas mais seguras e eficientes para o tratamento dos RSU. A combinação desta técnica com produção de energia eléctrica, por recuperação de calor da combustão dos resíduos, tem contribuído gradualmente para o desenvolvimento socioeconómico.

Este trabalho surgiu da necessidade de optimização do sistema de controlo dos gases ácidos, (HCl, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> e HF), da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos, (CTRSU), da Empresa Valorsul e dos respectivos consumos dos reagentes utilizados no tratamento dos referidos gases, nomeadamente o leite de cal e a amónia. No entanto, procedeu-se apenas com uma análise detalhada do referido sistema de controlo, de modo a identificar as principais dificuldades e possíveis soluções teóricas para as mesmas. Os conhecimentos adquiridos poderão contribuir futuramente para a optimização do sistema de controlo em questão, de modo a garantir a dosagem óptima dos referidos reagentes, diminuindo assim o custo dos mesmos.

O presente trabalho também tem como objectivos, a compreensão da tecnologia de valorização energética de resíduos no contexto do tratamento de RSU em Portugal e a análise do processo de formação dos gases durante a combustão dos RSU, principalmente a dos gases ácidos.

Em Portugal o tratamento dos RSU é sobretudo por eliminação, deposição directa em aterro sanitário, tendo ocupado em 2012, uma percentagem de 54% do total dos RSU produzidos, no entanto a valorização tem vindo a desenvolver-se e actualmente cerca de 21% dos resíduos produzidos é valorizado energeticamente. Do mesmo modo, a Reciclagem e a valorização orgânica têm progredido nos últimos anos, embora lentamente.

A formação dos gases ácidos é influenciada sobretudo pela composição física dos RSU, que contém na sua matriz materiais constituídos por átomos de azoto, enxofre, cloro e fluor e por certas condições operatórias de incineração, nomeadamente temperatura elevadas, humidade e excesso de ar. A composição física dos resíduos é um parâmetro não controlável pelo operador do sistema de tratamento dos gases, pelo que as condições de incineração devem ser adequadamente controladas, no âmbito de prevenir ou reduzir a formação destes gases.

A CTRSU da Valorsul apresenta, em geral, um sistema de tratamento dos gases eficiente, garantido assim que os valores limites de emissão dos gases se encontrem em conformidade com a lei. No entanto, para cumprir este requisito é necessário um consumo excessivo da amónia e leite de cal utilizados no tratamento destes gases. O elevado consumo destes reagentes deve-se sobretudo à dificuldade de optimização da dosagem dos mesmos, como

consequência de um atraso verificado no sistema de controlo dos gases implementado na Central, “*Sample and Hold PID*”. Este atraso é de aproximadamente dois minutos e é causado pelo tempo em que os gases levam a percorrer o ponto onde é feita a injeção dos reagentes até ao ponto de extracção dos gases na chaminé, mais o tempo de atraso imposto pelo sistema de monitorização em contínuo das emissões.

Através do *software simulink* do *MATLAB* realizou-se uma simples simulação do sistema de controlo de emissão dos gases NOx e caudal de amónia, em malha aberta com controlador proporcional, com o objectivo de reproduzir os resultados obtidos através de um controlo real em malha aberta realizada na CTRSU. Verificou-se que estes estão de acordo com o esperado, ou seja as saídas dos controladores do caudal de amónia e concentração do NOx, correspondem às variações efectuadas na válvula de regulação de amónia.

Como possíveis soluções teóricas para a redução do atraso do sistema, sugeriu-se a introdução de um compensador de atraso baseado na técnica de Predição de Smith, no sistema de controlo já implementado, ou a implementação de um novo sistema de controlo baseado em sistemas de inteligências artificiais, nomeadamente as Redes Neurais.

**Palavras-chaves:** Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos, Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos, Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos da Valorsul, Valorsul, Emissões atmosféricas, Sistema de tratamento dos gases de combustão, sistemas de controlo PID.

## Abstract

The system to treat the gases, formed during Municipal Solid Waste (MSW) incineration, is one of the most important components of a waste incineration plant. Its control and optimization ensure the reduction of harmful gases formed, to values that not represent risks to the public and environmental health, which makes incineration one of the safest and most efficient techniques to treat MSW. The Combination of this technique with energy production, (electricity), through heat recovery from waste combustion, has contributed to socio-economic development.

This study comes from the need to optimize the control system of emission of acid gases (HCl, NO<sub>x</sub>, HF and SO<sub>2</sub>) from “Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos”, (CTRSU), of the VALORSUL company and optimize the consumption of the reagents used for treating these gases, in particular ammonia and lime milk. However, this study only proceeded with detailed analysis of acid gases control system, in order to identify the main difficulties and possible theoretical solutions to them. This knowledge can contribute, in the future, to optimize the control system, which ensures the optimal dosage of these reagents, contributing also for the reduction of the cost of these raw materials.

This study also aims to understand the MSW management in Portugal, the waste to energy technologies and the analysis of the gases formation process during combustion of MSW, particularly the acid gases.

In Portugal, MSW are mainly treated by direct disposal in landfill, which in 2012, corresponded to 54% of total MSW produced, however, “waste to energy” has been developing and, currently, about 21% of the total MSW produced is valued energetically. Recycling and organic recovery also have progressed in recent years, however, slowly.

The formation of the acid gases is largely influenced by the physical composition of MSW, which contains materials constituted by atoms like nitrogen, sulfur, chlorine and fluorine and certain combustion conditions, including high temperature, humidity and excess air. The physical composition of waste is a non-controllable parameter, therefore, incineration conditions must be rightly controlled in order to reduce these gases formation.

The CTRSU of VALORSUL presents, in general, an efficient gas treatment system with emission values in accordance with the law. However, there is excessive consumption of reagents used in the treatment of these gases, mainly due to the difficulty of optimizing the dosage of these reagents, as a result of a delay time observed in the gas control system implemented, “Sample and Hold PID”. This delay time is approximately of two minutes and it is caused by the time the gases take to cross from the point where the reagent are injection, to the point of gas extraction, in the stack, plus the delay time imposed by the continuous emissions monitoring system.

Using the MATLAB/Simulink software, a simple simulation of the emission control system for NO<sub>x</sub> and ammonia flow, was made in open loop system, with a proportional controller, in order

to reproduce the results obtained experimentally, through a real control in open loop system, made in CTRSU. It was found that the results are in agreement with what was expected; in other words, the outputs of the ammonia flow and NO<sub>x</sub> concentration controllers correspond to the changes made in control valve of ammonia flow.

As the possible theoretically solutions for reducing the time delay of system, it was suggested to introduce a delay compensator, based on Smith prediction technique, in the control system, or the implementation of a new system based on artificial intelligence control systems, such as neural networks.

**Keywords:** Municipal Solid Waste Management, Municipal Solid Waste incineration, CTRSU of VALORSUL, Atmospheric emissions, Treatment system of the combustion gases, PID control systems.

## Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	iii
<b>Resumo</b> .....	v
<b>Abstract</b> .....	vii
<b>Índice de figuras</b> .....	xiii
<b>Índice de tabelas</b> .....	xv
<b>Siglas</b> .....	xvii
<b>Capítulo 1: Introdução</b> .....	1
1.1 Objectivos gerais e específicos .....	1
1.2 Metodologia .....	1
1.3 Enquadramento e estrutura do trabalho .....	2
1.4 Motivação para escolha do tema .....	3
<b>Capítulo 2: Resíduos Sólidos</b> .....	5
2.1 Definição e classificação .....	5
2.2 Resíduos Sólidos Urbanos .....	6
2.2.1 Gestão .....	6
2.2.2 Planos Estratégicos de Resíduos Sólidos Urbanos .....	9
2.2.3 .....	10
2.2.4 Produção e tratamento .....	10
2.2.5 Composição .....	13
2.2.6 Propriedades físicas e químicas .....	15
2.2.6.1 Propriedades físicas .....	15
2.2.6.2 Propriedades químicas .....	16
<b>Capítulo 3: Valorização energética de RSU - Incineração</b> .....	19
3.1 Conceitos .....	19
3.2 Contextualização histórica .....	20
3.3 Incineração em Portugal .....	21
3.4 Vantagens/Desvantagens .....	22
3.5 Gases resultantes da incineração de RSU .....	22
3.5.1 Monóxido de carbono .....	23

3.5.2	Partículas .....	24
3.5.3	Metais pesados .....	25
3.5.4	Compostos orgânicos .....	26
3.6	Gases ácidos .....	28
3.6.1	HCl, SO <sub>2</sub> e HF .....	28
3.6.1.1	Tecnologia de tratamento e de controlo de emissão .....	31
3.6.2	NOx .....	35
3.6.2.1	Tecnologia de tratamento e de controlo de emissão .....	38
3.6.3	Impactos ambientais dos gases ácidos .....	40
3.7	Enquadramento regulamentar do sector de incineração de RSU .....	41
<b>Capítulo 4: Valorsul.....</b>		<b>47</b>
4.1	Apresentação da Empresa .....	47
4.1.1	Gestão de RSU .....	47
4.1.2	Recepção e tratamento dos RSU .....	49
4.1.3	Composição física dos RSU .....	49
4.2	Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos .....	50
4.2.1	Funcionamento da CTRSU .....	51
4.2.1.1	Recepção dos RSU .....	53
4.2.1.2	Combustão dos RSU .....	54
4.2.1.3	Produção de energia eléctrica.....	59
4.2.1.4	Sistema de tratamento dos efluentes gasosos .....	60
4.2.1.5	Gestão dos resíduos produzidos.....	64
4.2.2	Monitorização das emissões atmosféricas .....	66
4.2.2.1	Monitorização contínua .....	66
4.2.2.2	Monitorização descontínua .....	70
4.2.3	Sistema de controlo de emissão dos gases ácidos .....	71
4.2.3.1	Sistema de controlo dos gases NOx.....	75
4.2.3.2	Sistema de controlo dos gases HCl/SO <sub>2</sub> .....	76
4.2.3.3	Caracterização do sistema de controlo .....	77
4.2.3.4	Solução teórica para redução do tempo de atraso .....	83

4.2.3.5 Trabalhos futuros .....	87
<b>Capítulo 5: Conclusões .....</b>	<b>88</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>91</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>II</b>
Anexo 1: Lista Europeia dos Resíduos (LER) .....	II
Anexo 2: Resultados experimentais do sistema de controlo, em malha aberta, de emissão do NOx e caudal de amónia relativo ao aumento de 25% na abertura da válvula. ....	IV
Anexo 3: Determinação dos valores aproximados do caudal de amónia e concentração do NOx para a determinação dos parâmetros das funções de transferências. ....	XVI
Anexo 4: Flowsheet do processo de controlo em malha aberta implementado no simulink XXX	



## Índice de figuras

Figura 1: Classificação dos resíduos sólidos segundo a sua origem e característica.....	5
Figura 2: Hierarquia de Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos. ....	6
Figura 3: Sistemas de Gestão de RSU em Portugal Continental .....	8
Figura 4: Evolução de produção de RSU em Portugal e média europeia .....	11
Figura 5: Distribuição dos destinos dos RSU em Portugal Continental e Região Autónoma de Madeira em 2012. ....	12
Figura 6: Destino dos RSU nos países da União Europeia .....	13
Figura 7: Caracterização física dos RSU produzidos no Portugal Continental em 2011/2012 ..	14
Figura 8: Representação esquemática de filtros de mangas.....	25
Figura 9: Estrutura molecular de Dioxina e Furano. ....	26
Figura 10: Representação esquemática do sistema de tratamento semi-húmido dos gases ácidos. ....	33
Figura 11: Emissão dos gases NOx a partir do NOx-térmico, combustível e imediato .....	38
Figura 12: Representação esquemática do sistema de RCNS .....	40
Figura 13: Representação esquemática do Sistema de Gestão de RSU da Valorsul.....	47
Figura 14: Central de Tratamento dos RSU da Valorsul .....	50
Figura 15: Representação esquemática do funcionamento de uma central de incineração de RSU com valorização energética .....	52
Figura 16: Camião de recolha de resíduos indiferenciados e fossa de armazenamento de RSU. ....	54
Figura 17: Garras mecânicas .....	54
Figura 18: Incinerador de grelha .....	55
Figura 19: Câmara de Combustão. ....	56
Figura 20: Grelha “Reverse - Acting Stoker” da CTRSU .....	57
Figura 21: Conduta do ar total (ar de combustão) .....	58
Figura 22: Reactor de neutralização dos gases ácidos da CTRSU.....	62
Figura 23: Constituintes do sistema de Filtros de mangas. ....	63
Figura 24: Valorização das escórias pela CTRSU.....	65
Figura 25: Sistema de tratamento dos efluentes gasosos correspondentes às três linhas de incineração da CTRSU.....	66

Figura 26: Sistema de monitorização contínua dos efluentes gasosos.....	67
Figura 27: Analisador FTIR da marca ABB, ACF-NT para monitorização contínua dos gases. 67	
Figura 28: Analisador das partículas, modelo DR-300-40 do Grupo Durag. ....	68
Figura 29: Monitorização contínua dos poluentes da CTRSU da Valorsul relativamente ao 4º trimestre de 2013 .....	69
Figura 30: Sistema de controlo simplificada dos gases ácidos da CTRSU.....	72
Figura 31: Resposta típico de um controlado <i>Sample and Hold</i> .....	74
Figura 32: Diagrama de bloco simplificado do sistema de controlo de emissão do gás NOx e caudal de amónia da CTRSU.....	75
Figura 33: Diagrama de bloco simplificado do sistema de controlo de emissão do gás HCl e caudal de de leite de cal da CTRSU. ....	76
Figura 34: Resposta do sistema de controlo dos gases NOx, em função das variações da abertura da válvula de regulação do caudal de amónia. ....	77
Figura 35: Resposta do sistema de controlo de tratamento do NOx para variação na abertura da válvula de regulação do caudal de amónia, de 15% a 40%. ....	78
Figura 36: Ajuste entre a concentração do NOx medida e NOx aproximada. ....	80
Figura 37: Ajuste entre o caudal de NH <sub>3</sub> medido e NH <sub>3</sub> aproximado. ....	81
Figura 38: Variação do caudal de amónia face ao aumento de 25% na abertura da válvula. ...	82
Figura 39: Variação da concentração do NOx face ao aumento de 25% na abertura da válvula. ....	82
Figura 40: Diagrama de bloco de um sistema de controlo com preditor de Smith. ....	83
Figura 41: Diagrama de bloco simplificado de um sistema de controlo com preditor de Smith. 84	
Figura 42: Diagrama de blocos do sistema de controlo, em malha fechada, da emissão do NOx e caudal de amónia. ....	86
Figura 43: Diagrama de blocos alternativo do sistema de controlo de emissão do NOx e caudal de amónia pelo método de predição de Smith.....	86
Figura 44: <i>Flowsheet</i> do processo de controlo da emissão do NOx e caudal de amónia em malha aberta, implementado no <i>simulink</i> .....	XXX

## Índice de tabelas

Tabela 1: Relação entre a constituição física dos RSU e o método de tratamento. ....	14
Tabela 2: Teor de humidade e densidade de alguns componentes dos RSU .....	16
Tabela 3: Análise química imediata e elementar dos RSU.....	17
Tabela 4: Poder calorífico de materiais normalmente encontrados nos RSU .....	18
Tabela 5: VLE dos efluentes gasosos provenientes de centrais de incineração de RSU com valorização energética .....	43
Tabela 6: VLE constante na Licença Ambiental da CTRSU da Valorsul.....	44
Tabela 7: Intervalo de confiança a considerar face a incerteza de medição. ....	45
Tabela 8: Dados de recepção e tratamento dos RSU na Valorsul .....	49
Tabela 9: Composição física dos RSU da CTRSU - Valorsul em 2012.....	49
Tabela 10: Dados de exploração da CTRSU da Valorsul, nos últimos cinco anos .....	50
Tabela 11: Tecnologias utilizadas no tratamento dos gases da CTRSU .....	60
Tabela 12: Consumo do leite de cal, amónia e carvão activado no tratamento dos gases de combustão da CTRSU .....	63
Tabela 13: Eficiência do sistema de tratamento de gases da Central de incineração de RSU da Lipor.....	64
Tabela 14: Monitorização descontínua da CTRSU no ano 2013.....	71
Tabela 15: Lista Europeia dos Resíduos (LER).....	II
Tabela 16: Resultados experimentais do sistema de controlo, em malha aberta, de emissão do NOx e caudal de amónia.....	IV
Tabela 17: Cálculo do caudal de NH <sub>3</sub> aproximado. ....	XVI
Tabela 18: Cálculo da concentração do NOx aproximada .....	XVII



## **Siglas**

**APA:** Agência Portuguesa do Ambiente

**BAT:** *Best Available Technologies*

**BREF:** *Best Available Techniques for Waste Incineration Reference Documents*

**CCDR:** Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional e do Centro

**CE:** Comissão Europeia

**COT:** Carbono Orgânico Total

**CTRSU:** Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos

**EGF:** Empresa Geral do Fomento

**ENRUBDA:** Estratégia Nacional para Redução dos Resíduos Urbanos Biodegradáveis depositados em Aterro.

**EPE:** Empresa de Pesquisa Energética

**ERSAR:** Entidade reguladora dos Serviços de Água e Resíduos

**UE:** União Europeia

**FTIR:** Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier

**IBAM:** Instituto Brasileiro de Administração Municipal

**IC:** intervalo de confiança

**ETVE:** Instalação de Tratamento e Valorização de Escórias

**LA:** Licença Ambiental

**LE:** Licença de Exploração

**LER:** Lista Europeia de Resíduos

**NOx:** Óxidos de azotos

**OCDE:** Organização para Cooperação e o Desenvolvimento Económico

**PCDD:** Policlorodibenzodioxinas

**PCDF:** Policlorodibenzofuranos

**PCI:** Poder Calorífico Inferior

**PCN:** Poder Calorífico Nominal

**PCS:** Poder Calorífico Superior

**PEBD:** Polietileno de Baixa Densidade

**PERSU:** Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos

**PET:** Polietileno Tereftalato

**PID:** Proporcional-Integral-Derivativo

**PM10:** Partículas inaláveis com diâmetro inferior a 10 µm

**PM2.5:** Partículas finas com diâmetro inferior a 2.5 µm

**PVC:** Policloreto de vinilo

**RARU:** Relatório Anual dos Resíduos Urbanos

**RASARP:** Relatório Anual dos Serviços de Água e Resíduos em Portugal

**RNCS:** Redução Não Catalítica Selectiva

**RCS:** Redução Catalítica Selectiva

**RS:** Resíduos sólidos

**RSU:** Resíduos sólidos Urbanos

**RU:** Resíduos Urbanos

**SGR:** Sistema de Gestão de Resíduos

**SM:** Sistema Municipal

**SMM:** Sistema Multimunicipal

**TMB:** Tratamento Mecânico e Biológico

**VLE:** Valor Limite de Emissão

**WHO:** World Health Organization

## **Capítulo 1: Introdução**

A economia mundial tem evoluído rapidamente e a quantidade dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) produzidos tem seguido essa evolução. Em muitos países, especialmente os mais povoados, os aterros sanitários são incapazes de lidar com este aumento de produção de resíduos levando os Governos a considerarem a incineração de RSU como um método alternativo de tratamento, contribuindo deste modo para a diminuição da taxa de enchimento dos aterros, tendo em conta que o volume dos resíduos é diminuído consideravelmente. Este método também possui a vantagem de produzir energia sob a forma de vapor, utilizado na produção de electricidade e aquecimento. Contudo devido ao crescimento mundial de fábricas de incineração ou incineradores de RSU houve também o aumento de preocupações públicas devido às emissões dos gases produzidos durante a combustão dos resíduos. Desta forma, a actividade de incineração de RSU foi alvo de regulamentação no sentido de limitar as emissões dos gases nocivos produzidos. Actualmente, para a aprovação de qualquer projecto de incineração de resíduos é necessário que uma empresa forneça condições adequadas de protecção do meio ambiente, utilizando as melhores tecnologias disponíveis.

Neste sentido, seguem-se os principais objectivos deste presente trabalho, as metodologias empregues para o cumprimento dos mesmos e as motivações que levaram a escolha do tema da presente dissertação.

### **1.1 Objectivos gerais e específicos**

A presente dissertação tem como objectivos gerais, efectuar uma análise geral da gestão dos RSU em Portugal, bem como, focar as características dos RSU e a sua respectiva produção, com a finalidade de compreender o sistema de tratamento e gestão destes resíduos e a importância da valorização energética no sistema. Pretende-se ainda, conhecer o processo de incineração de RSU e o funcionamento da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos, (CTRSU), da Valorsul, nos seus vários componentes e subsistemas.

Como objectivos específicos, pretende-se realizar uma análise detalhada do sistema de tratamento de gases, das tecnologias utilizadas, efectuar um estudo sobre a formação dos gases ácidos resultantes da combustão de resíduos, caracterizar e avaliar o sistema de controlo da redução de gases, assim como, identificar os principais problemas associados a este sistema e por último apresentar possíveis soluções de melhoria para o sistema em estudo.

### **1.2 Metodologia**

A análise do sistema de tratamento de efluentes gasosos de uma Central de Valorização energética de RSU, teve por base pesquisas bibliográficas efectuadas sobre esta temática, bem como, uma recolha de informação relativos ao sistema de tratamento e de controlo dos gases da CTRSU, durante as visitas à unidade.

As pesquisas bibliográficas incidiram sobre trabalhos científicos e académicos, livros sobre a temática, bem como, o enquadramento regulamentar do sector nomeadamente o alusivo à gestão de RSU, (Decreto-lei nº 73/2011), e sobre emissões industriais, (Decreto-lei nº 127/2013).

As informações relativas à CTRSU da Valorsul foram obtidas através de visitas à unidade, nas quais se passou a conhecer o funcionamento da Central e as características do sistema de tratamento de gases, bem como através de documentos disponibilizadas pela empresa.

Os diagramas de blocos apresentados relativos ao sistema de controlo dos gases, foram executados com base nas informações recolhidas sobre o sistema de controlo dos gases ácidos da CTRSU e baseados em literatura de sistemas de controlo de processos químicos.

A análise das respostas do sistema de controlo em questão, em malha aberta, foi efectuada utilizando o *software simulink do MATLAB*.

### **1.3 Enquadramento e estrutura do trabalho**

O presente trabalho final de mestrado realizou-se no âmbito do Mestrado em Engenharia Química e Biológica e teve a colaboração da CTRSU da empresa Valorsul.

O trabalho tem por objectivos a compreensão da tecnologia de valorização energética de resíduos no contexto do tratamento de RSU em Portugal, a análise do processo de formação dos gases durante a combustão dos resíduos, principalmente os gases ácidos, bem como a análise do sistema de tratamento dos gases da CTRSU.

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos:

O primeiro capítulo corresponde à introdução onde se faz a estruturação do trabalho e uma abordagem geral daquilo que constitui o objecto de estudo. É apresentada uma análise sobre as motivações que levaram à escolha do tema e são definidos os objectivos gerais e específicos do presente trabalho e os métodos de trabalho utilizados.

O segundo capítulo corresponde a uma abordagem geral sobre os RSU e a sua gestão em Portugal.

No terceiro capítulo, apresentam-se algumas considerações gerais relativas à valorização energética de RSU através da incineração, fazem-se referências às principais incineradoras existentes em Portugal e por último um estudo sobre a formação dos gases ácidos (HCl, SO<sub>x</sub>, HF e NO<sub>x</sub>) durante a incineração de RSU.

No quarto capítulo faz-se uma caracterização geral da empresa Valorsul e o respectivo sistema de gestão de RSU. Apresenta-se também um estudo detalhado sobre o funcionamento da Central de incineração da Valorsul assim como, a análise do sistema de controlo do tratamento dos gases ácidos da unidade, as principais dificuldades encontradas no sistema de controlo e apresentação de possíveis soluções.

O quinto e último capítulo deste trabalho corresponde a uma conclusão, onde se apresenta de forma sucinta uma reflexão sobre os pontos cruciais do trabalho.

#### **1.4 Motivação para escolha do tema**

A produção de resíduos resulta das actividades económicas que caracterizam o nosso dia-a-dia, tendo início na extracção da matéria-prima da natureza para produção de novos produtos e fim no momento em que estes deixam de ter alguma utilidade para o consumidor.

Segundo COM (2011)<sup>1</sup>, citado pela Portaria n.º 187 – A/2014, a produção dos resíduos nos países da União Europeia no ano 2010 foi de 2.7 mil milhões de toneladas, que equivale a uma capitação de 5.2 toneladas por habitante. Em Portugal, em 2012, foram produzidos 14,3 milhões de toneladas de resíduos, dos quais 4.8 milhões de toneladas corresponderam à produção dos RSU. Os RSU representam cerca de 34% do total de resíduos produzidos em Portugal, representando uma quantidade significativa dos resíduos produzidos (Portaria n.º 187 – A/2014).

Da observação dos dados estatísticos anteriormente apresentados, torna-se evidente a preocupação em torno deste tema e percebe-se a necessidade de métodos e mecanismos eficientes que permitam o tratamento desses resíduos, diminuindo o impacto negativo que possam ter na saúde pública e no ambiente. Neste sentido, a temática gestão de RSU, é fundamental para o desenvolvimento das sociedades ao procurar soluções que permitam valorizar os resíduos e proporcionar um destino seguro para os que não possam ser valorizados, contribuindo para a melhoria da nossa qualidade de vida e preservação do meio ambiente.

Tendo em conta o meu país de origem, Cabo Verde, um País em vias de desenvolvimento, com poucos recursos e que enfrenta no dia-a-dia de problemas relacionados com a gestão de RSU, sobretudo a Cidade da Praia, Capital do País, onde existe uma maior concentração populacional, interessa-me estudar e conhecer o sector dos RSU, as suas tecnologias e em particular a tecnologia de valorização energética de resíduos, do ponto de vista do seu funcionamento, suas vantagens/desvantagens e implicações de natureza ambiental.

Nesta medida, a empresa Valorsul S.A., uma das maiores e mais conceituadas no ramo de gestão dos RSU em Portugal, representa uma oportunidade única de conhecer em detalhe uma instalação de valorização energética, permitindo-me adquirir novos conhecimentos e consolidar determinados conceitos. Conhecimentos estes, que no futuro próximo poderão ser úteis e contribuir para melhorar e desenvolver o sistema de gestão de RSU do meu País.

---

<sup>1</sup> COM (2011) 571 final. Roteiro para uma Europa Eficiente na utilização de recursos, Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões.



## Capítulo 2: Resíduos Sólidos

### 2.1 Definição e classificação

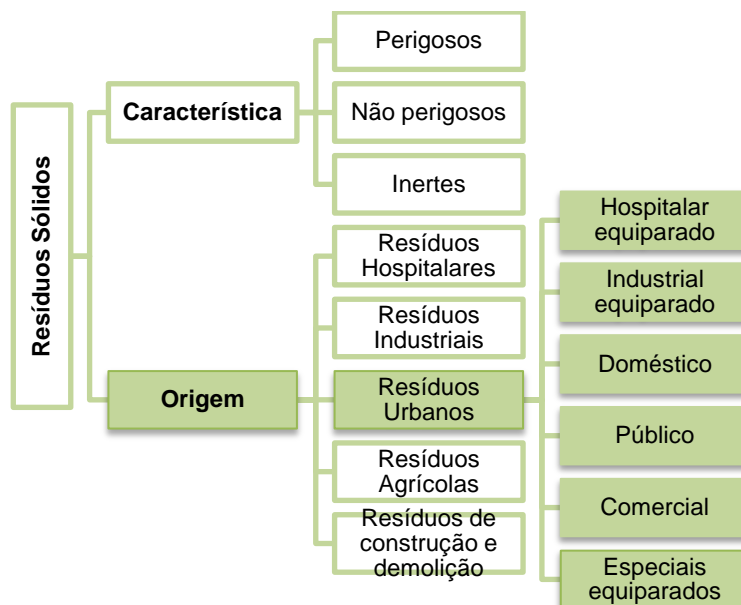
A nível nacional, a definição de resíduos encontra-se regulamentada no Decreto-Lei n.º 178/2006 de 5 de Setembro, alterado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011 de 17 de Junho, que estabelece o Regime Geral de Gestão de Resíduos, transpondo para ordem jurídica interna a Directiva n.º 2008/98/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro.

De acordo com o artigo 3.º do referido Decreto-Lei, resíduo é “qualquer substância ou objecto de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer” nomeadamente os indicados na Lista Europeia de Resíduos, (LER).

A LER, publicada na portaria n.º 209/2004 de 3 de Março, é uma lista harmonizada de resíduos que “assegura a harmonização da normativa vigente em matéria de identificação e classificação de resíduos, ao mesmo tempo que visa facilitar um perfeito conhecimento pelos agentes económicos do regime jurídico a que estão sujeitos”.

Normalmente os resíduos são classificados segundo a sua origem, de acordo com o Decreto-Lei n.º 73/2011. No entanto, é possível também classifica-los segundo as suas características e origem pela LER.

A figura que se segue, Figura 1, ilustra um resumo da classificação dos resíduos sólidos segundo as suas origens e características:



**Figura 1:** Classificação dos resíduos sólidos segundo a sua origem e característica. (Adaptada de Russo,2003)

A classificação é uma etapa fundamental na caracterização dos resíduos, tendo em conta que o grau de heterogeneidade dos resíduos é de tal forma elevado, que o conhecimento das suas características permite seleccionar o sistema de gestão e o método de tratamento mais

adequado, visto que cada tipo de resíduo está sujeito a diferentes regulamentações, quanto a processos de tratamentos, em função das suas características (Viegas, 2012; Cruz, 2005).

Tendo em conta que a CTRSU, unidade em estudo neste presente trabalho, se dedica ao tratamento de RSU, apenas estes serão considerados.

## 2.2 Resíduos Sólidos Urbanos

De acordo com o Decreto-Lei 73/2011, de 30 de Agosto de 2013, artigo 3.º, RSU ou Resíduo Urbano (RU), como é oficialmente designado são "r

*esíduos provenientes de habitações, bem como outros resíduos que, pela sua natureza ou composição, sejam semelhante aos resíduos provenientes de habitações."*

Estes resíduos encontram-se classificados na LER, pelo código 20, e incluem resíduos hospitalares equiparados, domésticos, públicos, comerciais e todos os outros resíduos do mesmo código que constam na referida lista, (anexo 1).

De notar que, os resíduos comerciais, hospitalares, industriais, que apresentam características semelhantes aos resíduos domésticos e que não representam perigo para a saúde pública e para o ambiente, são equiparados aos resíduos domésticos, isto é, são depositados em conjunto com os resíduos domésticos e é-lhes aplicado o mesmo tratamento, fazendo parte da rede dos RSU (Viegas, 2012).

### 2.2.1 Gestão

#### Enquadramento legal

Os princípios de gestão de resíduos estabelecem como prioridade a prevenção e redução na produção de resíduos, a reutilização e reciclagem multimaterial, seguida de outro tipo de valorização nomeadamente valorização energética, terminando como última prioridade na eliminação, nomeadamente em aterro sanitário. Esta Hierarquia de tratamento de resíduos, (Figura 2), está explícita no Regime Geral de Gestão de Resíduos em vigor, publicada no Decreto-Lei 73/2011.



**Figura 2:** Hierarquia de Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos.  
(Adaptada do Decreto-Lei 73/2011)

A eliminação deve ser considerada sempre a última opção de gestão de resíduos, tendo em conta os danos causados no meio ambiente, nomeadamente a poluição do solo e da água e a perda de recursos, pela não valorização dos resíduos, devendo esta opção restringir-se ao mínimo indispensável.

No Decreto-Lei n.º 73/2011 no anexo I encontram-se explicitadas as operações de eliminação de resíduos, assim como as operações de valorização, no anexo II.

A valorização energética de RSU é um dos métodos de tratamento abordado ao longo deste trabalho. Contudo, existem outros tipos de valorização dos RSU como por exemplo, a valorização por reciclagem, a valorização orgânica e todos os outros tipos de valorização que constam no referido Decreto – Lei.

A valorização energética é uma das operações de valorização de resíduos, (designada R1), e consiste na “*utilização dos resíduos como combustível principal ou outro meio de produção de energia. Esta operação inclui as instalações de incineração dedicadas ao processamento de RSU apenas quando a sua eficiência energética é igual ou superior a 0,60 para instalações em funcionamento e licenciadas nos termos da legislação comunitária aplicável antes de 1 de Janeiro de 2009 e 0,65 para instalações licenciadas após 31 de Dezembro de 2008.*”

A fórmula para o cálculo da eficiência energética é a que se segue:

$$\text{Eficiência energética} = \frac{[Ep - (Ef + Ei)]}{[0.97 * (Ew + Ef)]} \quad (1)$$

Em que:

**Ep**, representa a energia anual produzida sob a forma de calor ou electricidade (GJ/ano);

**Ef**, representa a entrada anual de energia no sistema a partir de combustíveis que contribuem para a produção de vapor (GJ/ano);

**Ew**, representa a energia anual contida nos resíduos tratados, calculada utilizando o valor calorífico líquido dos resíduos (GJ/ano);

**Ei**, representa a energia anual importada com exclusão de Ew e Ef (GJ/ano);

**0.97**, é um factor que representa as perdas de energia nas cinzas de fundo e por radiação

Caso as instalações não atinjam a referida eficiência energética serão classificadas como operações de eliminação de resíduos (operação D10 do anexo I do Decreto-Lei 73/2011) e os resíduos aí tratados serão considerados eliminados. Ou seja, nos termos da regulamentação europeia e nacional vigente, a incineração de RSU pode ser classificada como valorização ou como eliminação de resíduos, dependendo da eficiência energética à qual a operação ocorre.

### **Organização da gestão de RSU em Portugal Continental**

De acordo com a Portaria n.º 187 – A/2014, a gestão de RSU em Portugal Continental é assegurada por 23 sistemas de gestão de RSU: 12 multimunicipais (SMM) e 11 municipais (SM).

Os sistemas multimunicipais são concessões do Estado atribuídos a empresas que em regra têm uma participação maioritária da Empresa Geral de Fomentos, (EGF), *subholding* para a área dos resíduos do Grupo Águas de Portugal. Os sistemas que integram a EGF envolvem 174 municípios e geram cerca de 64% da produção de RSU. A EGF encontra-se actualmente, em processo de privatização.

Nos sistemas municipais, os municípios transferem a gestão dos resíduos para associações de municípios, empresas intermunicipais ou concessões privadas. As empresas intermunicipais podem ter capital total ou maioritariamente municipais.

Segundo ERSAR (2014), Os serviços de gestão de resíduos também são classificados segundo as designações de “alta” e “baixa”. Na componente designada por “baixa” inclui-se a recolha de resíduos e o seu encaminhamento para sistemas de tratamento; na componente designada por “alta” inclui-se o tratamento e encaminhamento para destino final dos resíduos. A figura que se segue, Figura 3, ilustra a distribuição dos diversos Sistemas de Gestão de Resíduos (SGR) pelo País:



**Figura 3:** Sistemas de Gestão de RSU em Portugal Continental (APA, 2013a)

Dos SGR representados verifica-se na posição 14 a Valorsul, empresa proprietária e gestonária da unidade em estudo, a CTRSU. Trata-se de uma empresa com sistema multimunicipal que é o maior em volume de resíduos, de todos os sistemas de gestão de RSU do País.

Os SM e SMM são constituídos na generalidade por ecopontos, ecocentros, estações de transferência e instalações de valorização/eliminação de resíduos (como por exemplo, central de triagem, incineradora, central de compostagem e aterro sanitário) (Viegas, 2012).

O serviço de gestão de RSU é prestado tendo por base um complexo sistema tecnológico que compreende as etapas de recolha, transporte, armazenagem, triagem, valorização e eliminação dos resíduos provenientes das habitações (ERSAR, 2013).

O sistema de recolha pode ser realizado de forma indiferenciada ou selectiva. A recolha indiferenciada pode ser realizada de forma domiciliária, (porta a porta), ou junto de contentores com capacidade de 800 litros a 5 m<sup>3</sup>. A recolha selectiva é realizada nos ecopontos com contentores distintos para o papel/cartão, vidro e embalagens, nomeadamente as de plástico. Na recolha selectiva os produtos são encaminhadas para as entidades responsáveis que procedem à sua reciclagem (Levy et. al., 2002).

Dos 23 sistemas de gestão de resíduos mencionados anteriormente, existem 259 entidades gestoras responsáveis pela recolha indiferenciada, referentes ao sector em “baixa”, 27 dos quais também são responsáveis pela recolha selectiva multimaterial dos RSU, em especial nas regiões da Grande Lisboa e Grande Porto. As entidades gestoras referentes ao sector em “alta” procedem em geral à recolha selectiva (Portaria n.º 187 – A/2014).

Em 2012, Portugal teve uma produção de 4.528 milhões de toneladas de RSU, dos quais 85,9% corresponderam à recolha indiferenciada e 14,1% à recolha selectiva (APA, 2013b).

Em paralelo à recolha indiferenciada é efectuada a recolha de electrodomésticos, móveis, entre outros, que são depositados em ecocentros. Os resíduos da recolha indiferenciada são encaminhados directamente para aterros sanitários, para unidades de valorização energética, para unidades de Tratamento Mecânico (TM) ou de Tratamento Mecânico e Biológico (TMB). Nas Unidades TM ou TMB os resíduos são triados e é separada a fracção orgânica que é aproveitada para a valorização orgânica, por compostagem ou digestão anaeróbia. Os resíduos recicláveis como por exemplo, papel/cartão, plásticos, vidros e metais, são enviados para as unidades de reciclagem e os restantes resíduos são encaminhados para aterro sanitário ou incineração (Levy et. al., 2002).

## **2.2.2 Planos Estratégicos de Resíduos Sólidos Urbanos**

Os Planos Estratégicos de RSU, PERSU, têm sido instrumentos de referências da política de gestão dos resíduos em Portugal Continental, que estabelecem as visões, os objectivos, as metas globais e específicas por SGR e as medidas a implementar durante um certo período de tempo, bem como as estratégias a adoptar que garantem o cumprimento dessas metas (Portaria n.º 187 – A/2014).

Já foram elaboradas três PERSU's: o PERSU I, o PERSU II e recentemente o PERSU 2020.

O PERSU I, aprovado em 1997 e actualizado em 1999, definiu um conjunto de orientações estratégicas no que respeita às intervenções indispensáveis para completar e melhorar a cobertura do País em relação à gestão de RSU, durante o período de 1997 a 2007. A sua implementação contribuiu para o encerramento das lixeiras, a criação de sistemas multimunicipais e intermunicipais de gestão de RSU, a construção de infra-estruturas de valorização e eliminação de resíduos e a criação de sistemas de recolha selectiva

multimaterial. Forneceu ainda linhas de orientação geral para a criação de sistemas de gestão de fluxos específicos de resíduos, abrindo caminho à criação de legislação própria e à constituição e licenciamento das respectivas entidades gestoras (ERSAR, 2013).

Em 2006 surgiu um novo instrumento de referência da política de gestão de RSU, o PERSU II que consubstanciou a revisão das estratégias consignadas no PERSU I e na Estratégia Nacional para a Redução dos Resíduos Urbanos Biodegradáveis Destinados aos Aterros (ENRUBDA), para o período de 2007-2016. Foi aprovado pela Portaria n.º 187/2007 de 12 de Fevereiro e incluiu objectivos, metas e acções a implementar bem definidas e que decorrem da aplicação da legislação nacional e comunitária em vigor, nomeadamente no que respeita ao desvio de RSU biodegradáveis de aterro, à reciclagem e à valorização de resíduos de embalagem e à redução das emissões de gases com efeito de estufa (ERSAR, 2013).

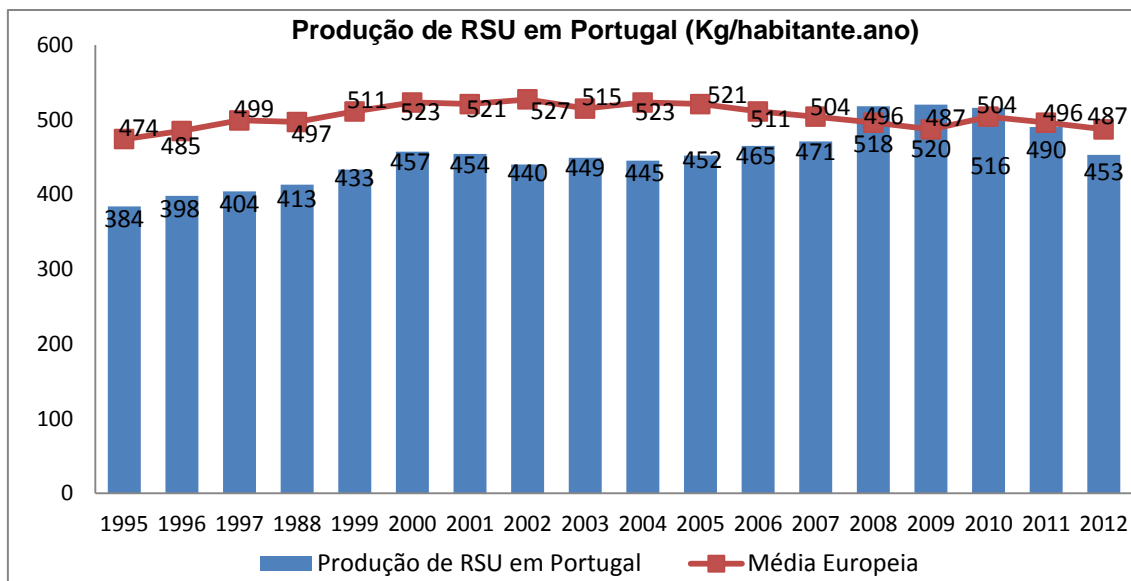
A implementação do PERSU II contribuiu no período de 2007 a 2012, para um aumento das unidades TMB destinadas à valorização orgânica e reciclagem de RSU e para a melhoria da rede de recolha selectiva; introduziu modificações na configuração dos SGR e nas opções de gestão dos mesmos e ainda contribuiu para um reforço de aplicação da hierarquia de gestão dos RSU, tendente para uma sociedade mais vocacionada para a reciclagem e valorização orgânica de resíduos biodegradáveis.

Contudo, verificaram-se desvios às metas traçadas no PERSU II nomeadamente, a utilização predominante da deposição de RSU em aterro e capitações de recolha selectiva abaixo do proposto. Neste sentido, procedeu-se à elaboração de um novo PERSU, o PERSU 2020 publicada pela Portaria n.º 187 – A/2014 de 17 de Setembro, que visa estabelecer novos planos para os anos 2014-2020. Este novo PERSU permite a definição de metas de retomas de recolha selectiva, metas de desvio de RSU biodegradáveis de aterro e metas de preparação para reutilização e reciclagem para cada SGR (Portaria n.º 187 – A/2014).

### **2.2.3**

#### **2.2.4 Produção e tratamento**

A figura que se segue, Figura 4, ilustra a evolução da produção de RSU em Portugal desde o ano 1995 até o ano 2012 e sua comparação com a média europeia, de acordo com os dados publicados no Eurostat.



**Figura 4:** Evolução de produção de RSU em Portugal e média europeia<sup>2</sup>  
(Eurostat, 2014)

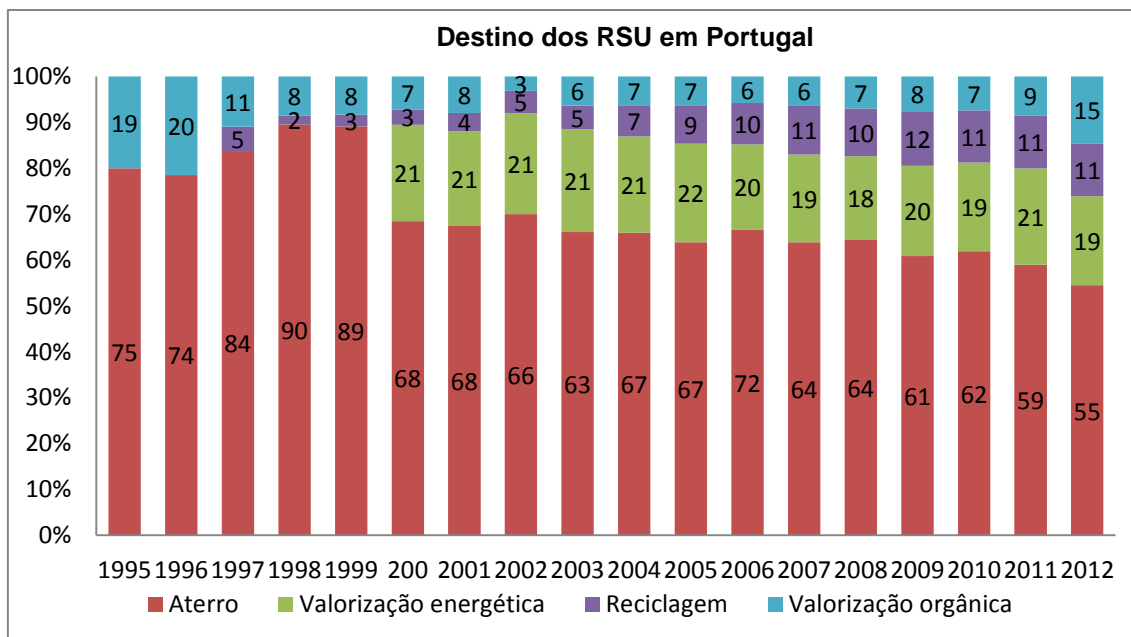
Da análise do gráfico verifica-se que, a partir de meados da década 90 até cerca de 2009, houve um aumento na produção dos RSU em Portugal convergindo com a média europeia, onde também verificou-se uma tendência de crescimento dos resíduos. Nos últimos três anos (2010, 2011 e 2012), houve um decréscimo acentuado na produção dos RSU em Portugal resultante da crise económica e das conseqüentes alterações nos padrões de consumo. Na União Europeia (UE), no mesmo período, verificou-se uma diminuição da produção de RSU embora pouco significativa. Para além da crise económica, admite-se que as políticas de minimização da produção de resíduos também tenham contribuído para a redução verificada, como referido no Relatório Anual de Resíduos Urbanos de 2012<sup>3</sup>, (RARU).

Tomando como exemplo o ano de 2012, houve um decréscimo superior a 7% do total de RSU produzidos, tendo sido geridas pelos SGR um total de 4.782 mil toneladas, correspondendo a uma capitação de 453 Kg/hab.ano, inferior a capitação verificada na União Europeia no mesmo ano, que foi de 487 Kg/hab.ano (Eurostat, 2014).

Em relação aos destinos de tratamento dos RSU, considera-se os dados apresentados no gráfico da Figura 5, de acordo com o Eurostat.

<sup>2</sup> De notar que até ao ano 2006 a média europeia considerada é a de 27 países e de 2007 em diante a média europeia considerada é a de 28 países.

<sup>3</sup> "Admite-se ainda que a gestão cada vez mais racional dos recursos existentes e a adopção de políticas assentes nos princípios fundamentais da hierarquia dos resíduos, que privilegiam a prevenção, tem contribuído para inverter gradualmente a tendência de crescimento do total de resíduos produzidos".



**Figura 5:** Distribuição dos destinos dos RSU em Portugal Continental e Região Autónoma de Madeira em 2012. (Eurostat, 2014)

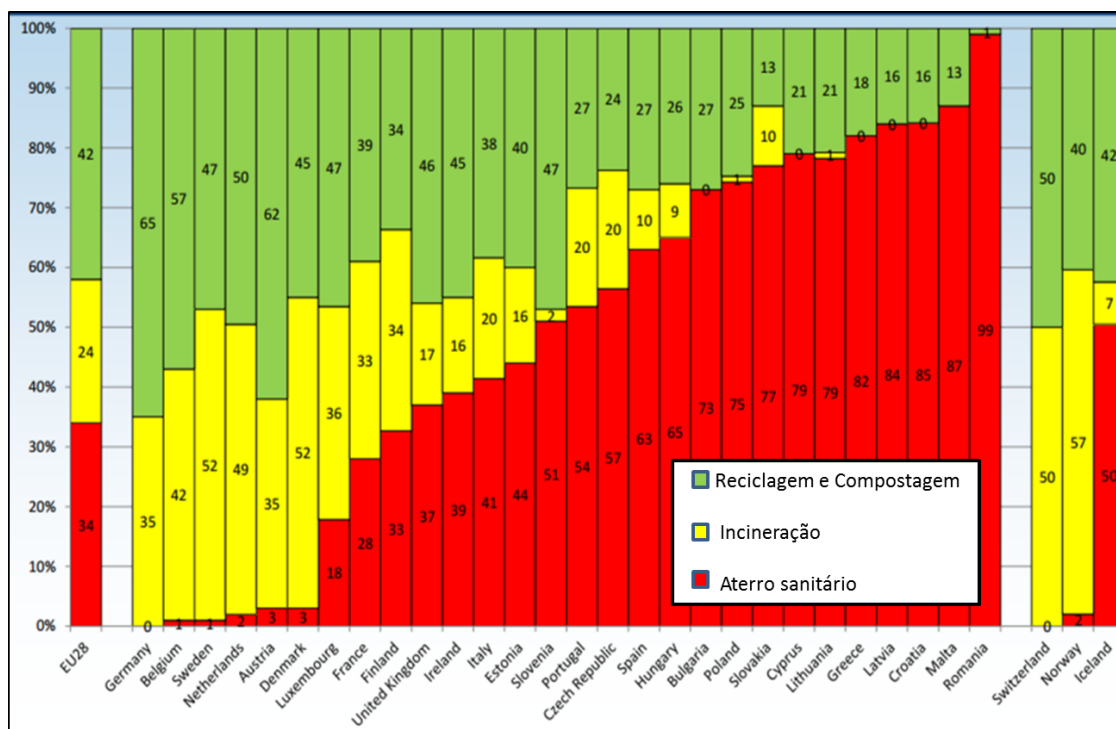
Verifica-se que até 1997<sup>4</sup> os RSU eram enviados na sua maioria para as lixeiras e aterros sem condições, que na época existiam no País. Os resíduos que não eram eliminados em lixeiras eram encaminhados para valorização orgânica (compostagem) de muito baixa qualidade. A partir do ano 1997, com a elaboração do PERSU I, apareceram os primeiros sistemas de valorização de RSU por reciclagem e procedeu-se ao encerramento das lixeiras, contribuindo para uma diminuição progressiva dos RSU nas lixeiras e aterros sanitários de baixa qualidade. No ano 2000, com o aparecimento das primeiras unidades de incineração de RSU, surge um aumento significativo da fracção de RSU valorizados. Esta tendência de aumento da valorização e redução da deposição directa de RSU em aterros sanitários têm-se mantido até a actualidade.

A percentagem dos resíduos depositados directamente em aterro no ano 2012 em comparação com 2011, desce de 59% para 55% enquanto o valor da valorização energética se mantém aproximadamente nos 21% desde o seu aparecimento. Verifica-se também um aumento progressivo mas lento da reciclagem e valorização orgânica ao longo dos anos considerados.

De acordo com CEWEP (2014), a nível europeu (média europeia dos 28 países), verifica-se que em 2012 a percentagem de RSU depositados em aterro foi de 34%, tendo a valorização energética alcançado 24%, enquanto a percentagem de reciclagem mais valorização orgânica foi de 42%. Em Portugal ainda existe maior utilização de aterros sanitários para deposição directa de RSU e menor reciclagem (11%) e valorização orgânica (15%). A incineração é o único meio de tratamento que mantém uma percentagem aproximadamente igual à média europeia (28 países), (21%).

<sup>4</sup> De notar que, no ano 1995 e 1996, nem todos os resíduos produzidos eram tratados e por isso a percentagem dos destinos dos RSU não correspondem ao total dos resíduos produzidos, naquela época.

Na figura que se segue, Figura 6, encontram-se representados os vários destinos atribuídos aos RSU em 2012, nos vários países da UE, (28 países + Suíça, Noruega e Islândia):



**Figura 6:** Destino dos RSU nos países da União Europeia (Adaptada de CEWEP, 2014)

Da análise do gráfico verifica-se que no ano 2012, o aterro sanitário foi o meio de tratamento predominante dos RSU, em mais de metade dos países considerados. Porém, nos países mais desenvolvidos como a Alemanha, Noruega, Suíça; Suécia, Bélgica, entre outros, a maior parte dos RSU produzidos são valorizados, (cerca de 90%), e a deposição em aterros é inferior a 5%. Em certos países, como por exemplo Portugal, Espanha, Polónia, entre outros, mais de metade dos RSU produzidos ainda são enviados para os aterros sanitários, colocando-os longe do desempenho que se verifica nos países mais desenvolvidos, neste sector. No entanto, existem certos países da Europa em situações mais críticas, em que a maior parte dos RSU produzidos são eliminados nos aterros, (cerca de 80 a 90%), nomeadamente a Roménia, a Croácia, a Grécia, entre outros.

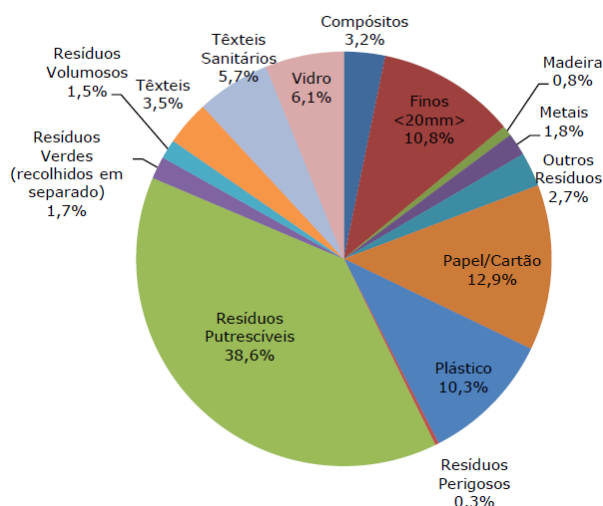
Em Portugal, apesar da deposição em aterro dos RSU ser superior aos outros métodos de tratamento, esta tem vindo a diminuir aos longos dos anos. Isto deve-se ao muito esforço efectuada pelos serviços de gestão de RSU no sentido de investirem mais em unidades que promovem a reciclagem e a valorização de RSU tal como a unidade TMB, onde se efectua um tratamento aos RSU, tendo em vista a sua separação por fluxos diferenciados, de modo a maximizar a recuperação de materiais recicláveis e valorizáveis (ERSUC, 2014 e APA, 2013a).

## 2.2.5 Composição

A Composição dos resíduos descreve os componentes individuais que constituem um fluxo de resíduos e a sua distribuição relativa, recorrendo geralmente a valores percentuais em peso.

Esta caracterização dos resíduos permite conhecer as suas características gerais e o seu comportamento quando submetidos a tratamento, valorização ou deposição em aterro.

As técnicas utilizadas para a caracterização dos RSU, constam na Portaria nº 851/2009 de 7 de Agosto. Inclui requisitos relativos à caracterização física dos RSU por componente (como por exemplo resíduos orgânicos, papel e cartão, vidro, plástico, entre outros). Na Figura 7, encontra-se o resultado da caracterização física média dos RSU produzidos no Continente, no ano 2011/2012, elaborada com base nas especificações técnicas da referida Portaria.



**Figura 7:** Caracterização física dos RSU produzidos no Portugal Continental em 2011/2012 (APA, 2013a)

De acordo com a caracterização física, os componentes presentes em maior quantidade nos RSU são os resíduos putrescíveis ou orgânicos. No entanto, é elevada também a quantidade de papel/cartão, de plásticos e dos finos, representando cada um mais de 10% dos componentes presentes nos resíduos. Os restantes componentes considerados ocupam uma percentagem inferior a 7% cada um. Verifica-se também que a quantidade de vidros e de têxteis é significativa, com uma percentagem superior a 5%, cada um.

O RSU é um material heterogéneo e a sua composição física depende do nível socioeconómico e das condições climáticas. Neste sentido, a caracterização é uma das etapas iniciais para uma eficiente gestão integrada de resíduos, bem como para o dimensionamento de unidades de deposição, tratamento/ valorização/reciclagem (Viegas, 2012).

Na tabela que se segue, tabela 1, encontram-se alguns exemplos da relação existente entre a constituição física dos resíduos e o método de tratamento adequado para os mesmos:

**Tabela 1:** Relação entre a constituição física dos RSU e o método de tratamento. (Adaptada de Manuel, 2007)

Tipo de material	Reciclagem	Valorização orgânica	Valorização energética
Papel/cartão	✓	✓	✓
Vidro	✓		
Plástico	✓		✓
Metals	✓		
Orgânicos		✓	✓
Têxteis	✓	✓	✓

No caso da incineração de RSU, a composição física dos resíduos assume uma importância particular, tendo em conta que influencia a formação dos gases durante a combustão. Resíduos ricos em plásticos, papel e cartão, originam maiores quantidades de gases ácidos ou gases com poder de acidificação, (seguidamente designados de gases ácidos), tais como, ácido clorídrico (HCl), óxidos de azoto (NOx), ácido fluorídrico (HF) e óxidos de enxofre principalmente o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>). Assim sendo, numa instalação de incineração, a composição dos resíduos influencia o projecto da instalação, mais precisamente o sistema de tratamento dos efluentes gasosos.

A influência da composição dos resíduos na formação dos gases durante a incineração, é um assunto abordado mais à frente, no capítulo 3, do presente trabalho.

## 2.2.6 Propriedades físicas e químicas

O conhecimento das propriedades físicas e químicas dos RSU ajudam a estabelecer um melhor método de tratamento e uso de tecnologias adequadas. Tendo em conta o método de tratamento deste trabalho, (incineração), seleccionou-se um conjunto de propriedades de maior importância para este.

### 2.2.6.1 Propriedades físicas

- **Massa volúmica:** Definido como a massa do material por unidade de volume, normalmente em kg/m<sup>3</sup>. A massa volúmica varia consoante a origem do resíduo, a época do ano, o tempo de armazenamento, o teor de humidade, a compactação, entre outros. Contribui posteriormente para a determinação do teor de humidade presente nos RSU.
- **Teor de humidade:** É a quantidade de água presente no RSU. O teor de humidade é obtido através da diferença de pesagem da amostra do resíduo ainda com humidade e da mesma amostra após secagem. O valor é apresentado em percentagem e representa a massa de água por unidade de massa do resíduo.

A fórmula de determinação do teor da humidade é a que se segue:

$$H = \left( \frac{W - d}{W} \right) * 100\% \quad (2)$$

Onde, “H” é o teor de humidade em percentagem, “W” é o peso da amostra original em gramas e “d” é o peso da amostra após desidratação a 105 °C, em gramas (Russo, 2003).

Este parâmetro altera-se em função das estações do ano e da incidência de chuvas. O teor de humidade nos RSU varia, em geral, em torno de 40 a 60%.

A humidade influencia directamente o poder calorífico e a massa específica dos resíduos, contribuindo de forma indirecta para o correcto dimensionamento de instalações de incineração. RSU com elevado teor de humidade tem um poder calorífico menor e contribui para diminuir a eficiência da incineração. A humidade também afecta o comportamento do material na primeira etapa de incineração, podendo ocorrer compactação destes sobre as grelhas, o que é indesejável (Russo, 2003).

A tabela que se segue, tabela 2, representa os valores típicos do teor de humidade e densidade dos RSU segundo os dados publicados no *Handbook of Solid Waste Management* (Tchobanoglous e Kreith, 2002):

**Tabela 2:** Teor de humidade e densidade de alguns componentes dos RSU  
(Adaptada de Tchobanoglous e Kreith, 2002)

Tipo de material	Teor de humidade (%)	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )
Papel	4-10	30-130
Cartão	4-8	30-80
Plásticos	1-4	30-130
Têxteis	6-15	30-100
Vidro	1-4	160-480
Orgânicos (alimentos)	50-80	120-480
Metais não ferrosos	2-4	60-240
Metais ferrosos	2-6	120-1200
RSU	15-40	90-180

De acordo com os dados representados na tabela 2, pode-se observar que os materiais presentes nos RSU, que contêm maior teor de humidade são os materiais orgânicos, com 50 a 80% e os têxteis com 6 a 15%. Tendo em conta que, na incineração de RSU quanto menor for o teor de humidade mais eficiente é a sua queima logo, a incineração de RSU onde predominam estes materiais é em princípio menos eficiente.

#### 2.2.6.2 Propriedades químicas

Para a determinação das opções de tratamento dos RSU, é importante conhecer as suas propriedades químicas, pois delas depende a sua capacidade de queima e conteúdo energético, factores importantes na incineração de RSU com valorização energética (Russo, 2003):

- **Composição química:** consiste na determinação dos teores de cinzas, teor de matéria volátil, teor em água (água de constituição), carbono fixo, ponto de fusão das cinzas. Para tal efectuam-se duas análises químicas específicas nomeadamente a análise imediata (*proximate analysis*) e análise elementar (*ultimate analysis*).
- ✓ **Análise imediata** (*proximate analysis*). Esta análise indica o comportamento dos resíduos quando são queimados, na qual determinam-se:
  - O teor em água (água de constituição): perda de massa após secagem a 105 °C, em equipamento específicos, durante uma hora.
  - O teor de material volátil (sólidos voláteis): perda de massa após combustão a 950 °C numa mufla.
  - O teor em cinzas: massa de resíduo que fica após a combustão a 950 °C numa mufla.
  - O carbono fixo: carbono residual que fica nas cinzas.
- ✓ **Análise elementar** (*ultimate analysis*): esta análise indica as características químicas dos resíduos e é utilizada sobretudo em processos de tratamento biológico de resíduos. A análise última envolve tipicamente a determinação das percentagens de Carbono; Hidrogénio; Oxigénio; Azoto; Enxofre e de Cinzas (Manuel, 2007; Pradhan, 2012).

Na tabela 3, encontram-se os valores típicos das referidas análises químicas para os RSU, segundo Tchobanoglous et al, citado por Manuel, (2007):

**Tabela 3:** Análise química imediata e elementar dos RSU.

<b>Análise imediata</b>	<b>% (em peso)</b>
Humidade	15-40
Materiais voláteis	40-60
Carbono fixo	5-12
Material não combustível (cinzas)	15-30
<b>Análise elementar</b>	<b>% (em peso)</b>
Carbono	40-60
Hidrogénio	4-8
Oxigénio	30-50
Azoto	0.2-1.0
Enxofre	0.05-0.3
Cinzas	1-10

Relativamente à análise elementar, conclui-se que os RSU são constituídos maioritariamente por compostos de carbono e oxigénio. Em relação à análise imediata, verifica-se que a percentagem dos materiais voláteis nos RSU é de 40 a 60%. Segundo Omari et.al. (2014), os RSU com alto teor de material volátil contêm baixo teor de carbono fixo e queimam com mais facilidade. Os mesmos autores reportaram ainda que, a queima de RSU com baixo teor de material não combustível é mais vantajoso para o ambiente tendo em conta que a probabilidade de estes resíduos conterem materiais como os metais pesados, cloro e compostos orgânicos é menor, evitando assim a poluição do meio ambiente, com estes compostos.

✓ **Ponto de fusão das cinzas:** Temperatura a partir da qual as cinzas formam um sólido por fusão e aglomeração das partículas, normalmente a temperaturas entre 1100 e 1200 °C (Russo, 2003).

- **Poder calorífico**

Poder calorífico é a quantidade de energia por unidade de massa ou volume sob a forma de calor, libertada durante a combustão completa de um material.

Normalmente consideram-se dois tipos de poder calorífico. O poder calorífico inferior, (PCI), é a energia libertada na forma de calor durante a combustão completa, e o poder calorífico superior (PCS), que é a soma de energia libertada durante a combustão e a energia recuperada na condensação do vapor de água que se forma durante a combustão.

Esta propriedade é importante pois, determina a eficiência da queima de um determinado tipo de resíduo e influencia o dimensionamento das instalações de todos os processos de tratamento térmico (incineração, pirólise e outros).

Na tabela a seguir, tabela 4, estão apresentadas os valores do poder calorífico de materiais normalmente presentes nos RSU:

**Tabela 4:** Poder calorífico de materiais normalmente encontrados nos RSU  
(Adaptada de Tchobanoglous e Kreith, 2002)

<b>Material</b>	<b>PC (kJ/kg de resíduos)</b>
Plásticos	27.900 - 37.200
Papel	11.600 - 18.600
Cartão	13.950 - 1.7450
Têxteis	15.100 - 18.600
Vidro	100 - 250
Orgânicos (Alimentos)	3.500 - 7.000
Metais ferrosos	250 - 1200
RSU	9.300 - 12.800

Da análise da tabela anterior, conclui-se que RSU em que predominam orgânicos, metais ferrosos e vidros tendem a apresentar menor poder calorífico, logo a queima de resíduos com abundância destes materiais é menos eficiente.

Segundo EPE (2008), a incineração de RSU com PCI menor que 7018,25 KJ/Kg é tecnicamente inviável, ou a fazer-se exigiria adição de quantidades significativas de combustível auxiliar. No entanto, resíduos com um PCI maior do que 8380 KJ/Kg, a queima é tecnicamente viável e quando realizadas em sistemas de queima em grelha é designada de queima em massa (*mass burning*), como é o caso da CTRSU da Valorsul, situação abordada posteriormente neste trabalho.

## Capítulo 3: Valorização energética de RSU - Incineração

### 3.1 Conceitos

Segundo o Decreto-Lei nº 127/2013, artigo 3.º, uma instalação de incineração é “qualquer unidade e equipamento técnico, fixo ou móvel, dedicado ao tratamento térmico de resíduos, com ou sem recuperação da energia térmica gerada pela combustão, incluindo a incineração de resíduos por oxidação e outros processos de tratamento térmico, como a pirólise, a gaseificação ou os processos de plasma, desde que as substâncias resultantes do tratamento sejam subsequentemente incineradas.”

A pirólise consiste na degradação térmica dos resíduos na ausência de oxigénio, resultando no final, gases de pirólise e um composto sólido (coque). É utilizado geralmente no tratamento de RSU, resíduos perigosos, lamas de Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), resíduos de descontaminação de solo, tratamento de resíduos sintéticos e pneus usados, entre outros.

A gaseificação consiste na combustão parcial de substâncias orgânicas para produzir gases que podem ser utilizados como matéria-prima (em processos de *reforming*) ou como combustível. A gaseificação pode ser empregue para o tratamento de RSU, resíduos perigosos ou tratamento de lodo de esgoto seco.

Tanto a pirólise como a gaseificação são métodos de tratamento que requerem tamanhos específicos de resíduos e por isso é necessário um pré-tratamento destes, a fim de colocar os resíduos dentro dos parâmetros predefinidos (BREF, 2006).

No presente trabalho é tratada a incineração dos resíduos por oxidação em ambientes ricos em ar (*mass burning*), com recuperação de energia, pelo que seguidamente os aspectos apresentados estão relacionados com esta tecnologia de valorização energética dos resíduos.

A incineração consiste num processo termoquímico de tratamento dos resíduos por oxidação na presença de oxigénio (Casian, 2013). A oxidação química é feita geralmente com excesso de ar, para se garantir a combustão completa dos RSU, e evitar a formação de gases indesejados, como é o caso do monóxido de carbono (CO). Normalmente, o excesso de oxigénio empregado na incineração é de 10 a 25% acima das necessidades de queima dos resíduos (IBAM, 2001).

Atendendo a que os RSU consistem essencialmente em material orgânico, minerais, metais e água, os materiais à base de carbono quando submetidas a altas temperaturas, decompõem-se libertando calor e originando um resíduo de cinzas e escórias. Durante o processo de queima ocorre a volatilização de diversos tipos de compostos contidos nos resíduos, que sob certas condições de operações, combinam quimicamente entre si originando vários tipos de gases. Estes gases contêm a maior parte de energia dos RSU disponível como calor (BREF, 2006). Este calor é posteriormente utilizado para produção de vapor, utilizado na produção de energia eléctrica ou aquecimento.

As tecnologias de incineração existentes estão relacionadas com a natureza dos RSU (perigosos ou não perigosos), o estado físico, a dimensão dos resíduos a incinerar, o teor de humidade e de cinzas e o poder calorífico, entre outras. Estas tecnologias incluem os incineradores de grelhas móveis ou fixas, os leitos fluidizados, o forno rotativo, os incineradores por plasma, entre outros. A incineração de RSU é geralmente efectuada em incineradores de grelhas (Casian, 2013). Na Europa cerca de 90% das centrais de valorização energética de RSU existentes utilizam esta tecnologia (BREF, 2006). Os fornos rotativos e os leitos fluidizados são geralmente utilizados para incineração de resíduos perigosos.

### **3.2 Contextualização histórica**

A primeira instalação de incineração para RSU foi construída em Manchester – Inglaterra, em 1876. Esta unidade funcionou durante cerca de 27 anos, tendo os resíduos produzidos sido usados como material de construção (Quina, 2005). A prática de incineração tornou-se comum em vários países europeus no final do século 19, primeiramente por questões de higiene e como forma de minimizar o volume dos resíduos. Só mais tarde, no século 20, é que surgiu a prática regular de aproveitamento de calor da combustão de resíduos para a produção da electricidade (CEWEP, 2014).

A grande expansão desta técnica ocorreu após a 2ª guerra mundial devido ao aumento considerável de RSU, uma vez que permitia a eliminação de grandes quantidades de resíduos.

No entanto, no início do século 20 não era efectuado qualquer tipo de tratamento dos gases formados durante a combustão dos resíduos, e estes eram descarregados directamente na atmosfera. Devido à consciencialização ambiental crescente foram sendo desenvolvidos sistemas de tratamento dos gases, que permitiam tratar e reduzir as emissões destes gases consideravelmente.

As instalações construídas nos anos 60 eram equipadas apenas com ciclones ou multiciclones, para remoção das partículas. Nas instalações construídas nos anos 70, estes foram substituídos por precipitadores electrostáticos, por apresentarem maior eficiência (Quina, 2005).

Nos anos 70 a 90 surgem tecnologias de lavagem e neutralização dos gases ácidos como é o caso da absorção destes em leite de cal (suspensão de hidróxido de cálcio), uma tecnologia eficiente que se utiliza até os dias de hoje (Rigato, 2008).

No entanto, havia ainda situações de emissões das dioxinas e furanos, durante a incineração de RSU. Segundo Quina (2005), o primeiro estudo (Olie et al., 1977), que evidenciou a presença de dioxinas e furanos nas cinzas volantes de três incineradoras na Holanda, foi publicado em 1977. Em seguida, estes compostos foram identificados também nos efluentes gasosos de todas as centrais de incineração existentes.

A ausência ou a precariedade dos equipamentos de controlo de poluição do ar que possuíam na altura, a falta de conhecimento sobre o mecanismo de formação destes compostos durante

a incineração, o tipo de resíduo que incineravam, a qualidade da combustão que executavam, contribuíram na altura para emissão excessiva das dioxinas e furanos. Neste sentido, a incineração dos RSU era considerada como uma das principais fontes de emissão destes compostos tóxicos, levando a população a sentir-se insegura e com receio em aceitar esta tecnologia, na altura.

Vários estudos foram desenvolvidos com o intuito de perceber melhor o mecanismo de formação das dioxinas e furanos e arranjar meios de controlo e prevenção de formação destes compostos. Inicialmente considerava-se que as dioxinas e furanos formavam somente através de compostos precursores, nomeadamente os clorobenzenos e clorofenóis. No entanto, no final dos anos 70, conclui-se que estes compostos e semelhantes se formam em todos os processos térmicos de combustão incompleta.

No que diz respeito à valorização energética de resíduos, a partir dos anos 90 foram desenvolvidos sistemas extremamente eficazes de controlo das emissões de dioxinas e furanos, de tal modo que os limites de emissão destes compostos se situam na ordem da décima de nanograma por normal metro cúbico. Os estudos ecotoxicológicos, (Reis et al, 2007), realizados, nomeadamente para a cidade de Lisboa, mostram que o efeito da incineração de resíduos é indetectável nos níveis de dioxinas e furanos nas populações e nos alimentos consumidos, concluindo assim, que a eficiência dos sistemas de tratamento e controlo de emissões destes poluentes é elevada.

A incineração dos RSU tem evoluído ao longo dos tempos e actualmente, todas as centrais existentes possuem um sistema integrado de tratamento dos gases de combustão, constituído por sistemas de remoção dos gases ácidos, partículas, dioxinas, furanos e metais pesados. Com o crescimento da consciencialização ambiental, foram desenvolvidos regulamentos que obrigam as centrais de incineração a adoptarem condições operatórias rigorosas de queima, contribuindo para a prevenção de formação de certos compostos como as dioxinas e furanos e sistemas sofisticados de neutralização dos gases ácidos que permitam de forma eficiente a redução de emissão dos mesmos para atmosfera. No que diz respeito a remoção das partículas, actualmente, a maior parte das instalações estão equipadas com filtros de mangas, apresentando maior eficiência do que os precipitadores electrostáticos utilizados nos anos 70. (Quina, 2005; CEWEP, 2014; Rigato, 2008).

### **3.3 Incineração em Portugal**

Em Portugal existem três instalações de incineração de RSU do tipo “queima em massa”, construídas no final dos anos 90: duas situadas no Continente e uma na Região Autónoma da Madeira. As do Continente estão localizadas na região de Lisboa e do Porto, propriedades das Empresas Valorsul e Lipor respectivamente. A da Região Autónoma da Madeira é propriedade da Empresa Valor Ambiente.

A Lipor, Serviço de Gestão de Resíduos do Grande Porto, inaugurada no ano 2000, é a entidade responsável pela gestão, valorização e tratamento dos RSU produzidos em oito

municípios que a integram: Espinho, Gondomar, Maia, Matosinhos, Porto, Póvoa de Varzim, Valongo e Vila do Conde, servindo uma população de aproximadamente um milhão de habitantes. A Central de Valorização Energética da referida Empresa, situada na Maia, tem como objectivo a valorização, na forma de energia eléctrica, da fracção de resíduos que não apresentam potencialidades de valorização pelos processos de reciclagem orgânica e multimaterial. A central possui duas linhas de tratamento em operação contínua, tratando em média cerca de 46 toneladas/hora de resíduos e uma potência eléctrica instalada de 25 MW (Lipor, 2014).

A Valor Ambiente gere os resíduos de onze municípios deste arquipélago servindo uma população de 246 mil habitantes. Iniciou a sua actividade em Outubro de 2004 e gere o Sistema de Transferência, Triagem, Tratamento e Valorização de Resíduos, situados nas regiões de Santa Cruz, Ribeira Brava e Porto Santo. A instalação de incineração de RSU, situada na Santa Cruz, possui duas linhas de incineração independentes e tem uma capacidade de processar 16 toneladas/hora de resíduos, e uma potência eléctrica instalada de 8 MW (Valor Ambiente, 2013).

A Empresa Valorsul e respectiva Central serão descritas em detalhe nos capítulos seguintes.

### **3.4 Vantagens/Desvantagens**

A valorização energética de resíduos é considerada um método seguro de tratamento dos RSU, sobretudo para os que não possam ser reutilizados ou reciclados, visto que reduz os impactos ambientais, devido ao controlo rigoroso das emissões gasosas e através da recuperação do conteúdo energético dos resíduos, produz-se um produto social e economicamente utilizável, a electricidade. A incineração proporciona ainda uma redução significativa do volume dos resíduos finais a serem depositados em aterros, em cerca de 90% em volume e 80 % em peso (Pássaro et. al., 2002). Das escórias que resultam da queima de resíduos, são recuperados metais ferrosos e não ferrosos e outros tipos de minerais, enviados para as unidades de reciclagem e utilizados posteriormente na construção civil. (CEWEP, 2014).

Contudo, a valorização energética de resíduos também apresenta desvantagens relativamente aos outros processos de tratamento e valorização, nomeadamente os elevados custos de investimento e operacional, devido às exigências ecológicas e de um controlo rigoroso do sistema de tratamento dos gases, entre outros. Neste sentido, a utilização desta tecnologia é limitada em países menos desenvolvidos. A sua prática exige mão-de-obra qualificada e a variabilidade da composição dos resíduos origina vários problemas operacionais, dificultando o controlo dos gases formados e o seu tratamento posterior (Pássaro et. al., 2002; Rand et. al., 2000).

### **3.5 Gases resultantes da incineração de RSU**

Os gases resultantes da incineração dos RSU são constituídos essencialmente por dióxido de carbono, oxigénio, azoto e vapor de água. Dependendo da composição dos resíduos, estes

gases podem também conter constituintes indesejáveis, subprodutos do processo de combustão, como são os gases ácidos: HCl; HF, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>; dioxinas e furanos; partículas potencialmente contaminadas com metais condensados, nomeadamente o cádmio (Cd) e mercúrio (Hg); e produtos da combustão incompleta dos resíduos, como por exemplo, o monóxido de carbono (CO).

Os níveis que estes gases podem atingir no interior da câmara de combustão dependem de uma série de factores nomeadamente, do tipo de tecnologia específica de cada unidade de incineração, da composição dos resíduos, do tipo de sistema de incineração, assim como dos parâmetros de operação (por exemplo, a temperatura e a velocidade dos gases de combustão, entre outros) (Mata e Coutinho, 2003).

Tendo em conta um dos objectivos específicos deste trabalho, mais precisamente o estudo do processo de formação dos gases ácidos, este será analisado com maior detalhe no subcapítulo 3.6 do presente trabalho, no entanto, no subcapítulo a seguir encontra-se uma breve análise dos restantes gases.

### **3.5.1 Monóxido de carbono**

Monóxido de carbono é um gás tóxico e inodoro produzido durante a combustão incompleta de compostos à base de carbono. É produzido quando o oxigénio ou a temperatura são insuficientes para que ocorra a oxidação completa do combustível, (RSU), para formar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Após a sua emissão para atmosfera, o CO é oxidado em CO<sub>2</sub> depois de algum tempo.

A concentração deste composto é medida continuamente nas instalações de incineração, para avaliação do processo de incineração e o objectivo é alcançar valores de emissões médias diárias abaixo dos 50 mg/Nm<sup>3</sup> (11% de O<sub>2</sub>) (BREF,2006).

#### **Impacto ambiental e na saúde pública**

A exposição Humana a concentrações elevadas do CO causa problemas respiratórios. O CO depois de inalado é rapidamente absorvido nos pulmões ligando-se à hemoglobina impedindo o transporte do oxigénio. Por isso, a exposição ao composto está também associada a problemas visuais, diminuição da capacidade de aprendizagem e capacidade de trabalho e aumento na mortalidade por enfarte cardíaco nos idosos (CETESB, 2012).

Além disso, a presença de CO nos efluentes gasosos no processo de incineração de resíduos representa uma redução da eficiência energética.

#### **Tecnologia de tratamento e de controlo de emissão**

A redução de formação deste composto passa, sobretudo, por operar com um certo excesso de ar que garante a combustão completa dos RSU evitando assim, a formação do mesmo (Júnior e Teixeira, 2003).

### **3.5.2 Partículas**

As partículas emitidas por uma central de incineração consistem em cinzas produzidas durante o processo de combustão e que são arrastadas durante o escoamento dos gases. São materiais finamente divididos que incluem as PM10 ou partículas inaláveis, que têm um diâmetro aerodinâmico inferior a 10 µm, e as PM2.5 ou partículas finas, que têm um diâmetro aerodinâmico inferior a 2.5 µm.

As partículas contêm substâncias inorgânicas (sulfatos, nitratos, metais) e substâncias orgânicas (hidrocarbonetos poliaromáticos, dioxinas e furanos). Quando se removem as partículas também se removem estas substâncias (BREF,2006; Júnior e Teixeira, 2003).

#### **Impacto ambiental e na saúde pública**

Estão entre os poluentes que apresentam maiores riscos para a saúde pública quando em elevadas concentrações. As partículas PM10 e PM2.5 incluem partículas inaláveis que são pequenas o suficiente para penetrar na região torácica do sistema respiratório. Os efeitos negativos na saúde são devidos à exposição a curto prazo (horas, dias) e a longo prazo (meses, anos). Estes incluem problemas respiratórios, cardiovasculares e cancro de pulmão. Os problemas respiratórios são causados na maioria das vezes pelas partículas PM10, por exposição a curto prazo. Os problemas de maior gravidade, como por exemplo a bronquite, diminuição da função pulmonar, são causados pelas partículas PM2.5, por exposição a longo prazo (WHO, 2013; Ferreira, 2007).

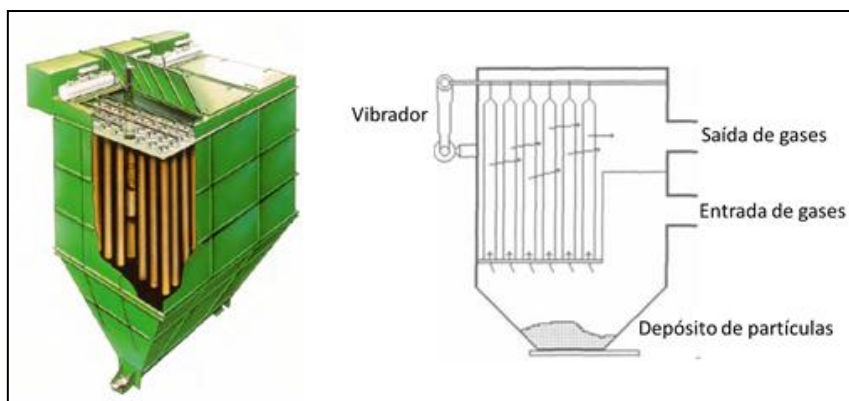
A nível ambiental, as partículas reduzem a visibilidade e alteram os níveis da radiação solar que atingem o solo e são precursoras da formação do ozono troposférico.

#### **Tecnologia de tratamento e de controlo de emissão**

Para reduzir a emissão deste poluente, as centrais de incineração estão equipadas geralmente com ciclones, filtros de mangas ou precipitadores electrostáticos (BREF,2006).

Os filtros de mangas são os mais utilizados para remoção das partículas. São geralmente de forma cilíndrica e dispostos em filas múltiplas para que haja uma área relativamente grande para a passagem dos gases (Júnior e Teixeira, 2003 e BREF, 2006). Devido a sua baixa porosidade, retêm partículas até diâmetros inferiores a 1 µm. O uso de lavadores (*scrubbers*) como complemento aos filtros de mangas é hoje uma prática corrente, uma vez que permitem a neutralização dos gases ácidos e consequentemente evitam a detioração dos filtros causado por estes gases (Quina, 2005).

A Figura 8 ilustra uma representação esquemática de filtros de mangas:



**Figura 8:** Representação esquemática de filtros de mangas.  
(Adaptada de Júnior e Teixeira, 2003; BREF, 2006)

Em operação contínua, há uma queda gradual de pressão do meio filtrante devido a depósitos de partículas. Para limpeza dos filtros, utiliza-se jactos de ar em fluxo inverso ou ainda jactos pulsantes de ar. Neste último caso, a limpeza realiza-se por meio de um pulso de ar a alta pressão, que expande violentamente as mangas (Júnior e Teixeira, 2003). Com a utilização desta tecnologia tem-se conseguido baixas emissões de partículas nas centrais de incineração (BREF, 2006).

### 3.5.3 Metais pesados

Os metais pesados mais comuns presentes nos efluentes gasosos de uma central de incineração são o mercúrio, cádmio, tálio, chumbo, níquel, crómio, entre outros. Contudo, o mercúrio e o cádmio são, geralmente, os que se encontram em maiores concentrações (BREF, 2006).

- **Mercúrio (Hg)**

O Hg encontra-se nos RSU devido à presença de baterias, termómetros, lâmpadas fluorescentes, interruptores de mercúrio ou amálgamas dentárias. A forma de emissão deste metal depende fortemente do ambiente químico do fluxo gasoso. Pode estar presente na forma de mercúrio metálico (Hg) ou cloreto de mercúrio ( $\text{HgCl}_2$ ). O  $\text{HgCl}_2$  forma-se a partir da reacção química do ião cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) com o ião mercúrio ( $\text{Hg}^+$ ). O ião cloreto é fornecido no fluxo gasoso a partir do HCl. Neste sentido, se a concentração do HCl no fluxo for elevada, o mercúrio encontra-se na forma de  $\text{HgCl}_2$  e se a concentração do HCl no fluxo for baixa, o Hg encontra-se sobretudo na forma metálica. O cloreto de mercúrio é mais solúvel em água do que o mercúrio metálico e por isso é facilmente removido nos *scrubbers* (BREF, 2006).

- **Outros metais**

Este grupo engloba: o cádmio (Cd); o arsénio (As); o chumbo (Pb); o crómio (Cr); o cobalto (Co); o manganês (Mn); o níquel (Ni); o cobre (Cu); o vanádio (V); o estanho (Sn); o antimónio (Sb) e os respectivos compostos destes metais.

### Impacto ambiental e na saúde pública

Alguns metais são altamente tóxicos e corrosivos, como é caso do Hg, Cd e Pb apresentando vários riscos para a saúde pública. São substâncias que podem ser inaladas, ingeridas ou absorvidas na pele. Podem acumular-se nos solos, chegando até a população através de certos alimentos, ou podem encontrar-se na atmosfera em forma de vapor, como é o caso do Hg. Causam certas doenças como, as irritações nos olhos e na pele, depressões, perdas de memória e até mesmo cancro a longo prazo, entre outros (BREF, 2006).

### Tecnologia de tratamento e de controlo de emissão

A maioria dos metais formam óxidos não voláteis que são removidos junto com as escórias e adsorvidos com as cinzas volantes. A exceção é fundamentalmente o mercúrio que volatiliza e surge nos gases de combustão em forma de vapor. Quanto aos metais que surgem associados às cinzas volantes, estes são eficazmente removidos juntamente com as partículas, como acima descrito. O Mercúrio e eventualmente outros metais que volatilizam, são eficazmente removidos por adsorção com carvão activado, que apresenta elevada eficiência. A gama de emissão do mercúrio nas centrais de incineração é de 0,0014 a 0,05 mg/Nm<sup>3</sup> (11% O<sub>2</sub>) (BREF, 2006).

### 3.5.4 Compostos orgânicos

Existem uma variedade de compostos orgânicos presentes no fluxo gasoso de uma central de incineração, nomeadamente: os hidrocarbonetos halogenados, os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, os BTX (benzeno, tolueno e xileno), as dioxinas e os furanos, entre outros. As dioxinas e furanos são os compostos orgânicos de maior importância numa central de incineração de RSU, visto que são os mais frequentes (BREF, 2006).

- **Dioxinas e furanos**

As dioxinas e furanos, também designadas por policlorodibenzodioxinas (PCDD) e policlorodibenzofuranos (PCDF), respectivamente, são produzidas e emitidas em todos os processos térmicos, quando há combustão de combustíveis clorados, não sendo um caso específico de incineração de RSU (BREF,2006).

Normalmente podem ocorrer 75 tipos diferentes de dioxinas, dependendo das posições ocupadas pelo átomo do cloro no núcleo do composto. Os furanos têm estrutura parecida com a das dioxinas, porém os anéis benzénicos são unidos apenas por um átomo de oxigénio. Como o núcleo é assimétrico, contrário das dioxinas, podem ocorrer 135 tipos de furanos (Júnior e Teixeira, 2003), conforme ilustrado na Figura 9.

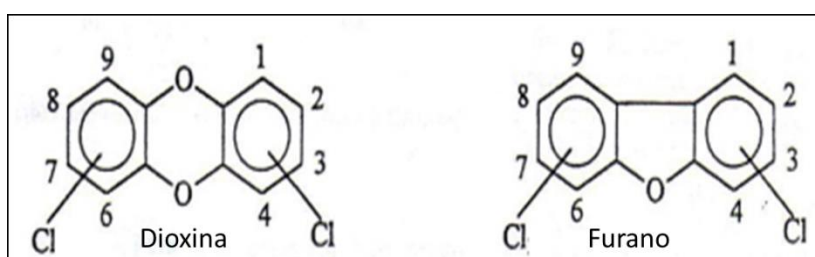


Figura 9: Estrutura molecular de Dioxina e Furano.

As vias de formação das dioxinas e furanos numa central de incineração são várias no entanto, destacam-se principalmente três:

- a) Através da destruição incompleta das dioxinas e compostos precursores que se encontram inicialmente nos RSU: se o ar fornecido for insuficiente e se não houver uma boa mistura entre os RSU e o oxigénio, ocorre a destruição incompleta destes compostos. No entanto, esta via é a menos provável tendo em conta as condições rigorosas de operação impostas pela lei, que garantem a destruição e prevenção de formação destes compostos.
- b) Através da síntese “De Novo”: reacção catalítica entre carbono ou composto deste e compostos de cloretos inorgânicos sobre metais óxidos, nomeadamente o cobre, presente nas cinzas volantes. Normalmente esta síntese ocorre nas zonas pós-combustão, onde existe arrefecimento dos gases mais precisamente nas caldeiras e nos sistemas de tratamento dos gases, (filtros de mangas), onde existe maior concentração de cinzas volantes e onde é maior a disponibilidade do carbono. Esta reacção ocorre entre os 200 a 400°C. O contacto entre os gases quentes e cinzas em suspensão e o arrefecimento lento dos gases contribuem para a reformação das dioxinas e furanos através desta síntese.
- c) Através de precursores nomeadamente o clorofenol e clorobenzeno: os precursores interagem com as espécies químicas que actuam como dadores de cloro, nomeadamente o HCl e PVC, ocorrendo ruptura térmica a altas temperaturas, (cerca de 200 a 800°C), e reordenação dos mesmos, formando as dioxinas e furanos. Ou ainda, pode ocorrer ruptura térmica e reordenação dos referidos precursores absorvidos sobre a partícula catalítica depositada nas cinzas volantes, a temperaturas entre os 200 e 400 °C.

A relação ente o PVC e as dioxinas e furanos, tem sido uma questão controversa ao longo dos tempos. Buekens e Huang (1998), fizeram uma revisão de estudos sobre este assunto e reportaram que, dos estudos efectuados, alguns apontam para uma relação positiva entre as dioxinas/furanos e PVC e outros não encontraram nenhuma relação.

Segundo Buekens e Huang (1998), a opinião recente sobre esta questão, tende a ser que, a quantidade normal do PVC presente nos RSU é de cerca de 1% em peso, o que não representa uma influência significativa na emissão das dioxinas e furanos. Neste contexto, a separação do PVC nos RSU não contribuiria para uma redução significativa das dioxinas e furanos, tendo em conta que existem outras fontes de cloro, nomeadamente os cloretos inorgânicos (Reis, 2009; Carvalho et. al., 2001; Júnior, 1994).

### **Impacto ambiental e na saúde pública**

As dioxinas e furanos são compostos tóxicos e cancerígenos. Quando libertadas no ambiente acumulam-se no solo e na água, chegando até à população através de diversos tipos de alimentos, sobretudo os mais ricos em gordura, por serem compostos lipossolúveis. Os mesmos fixam-se maioritariamente no solo, tendo em conta que os presentes no ar acabam por se depositarem no solo depois de algum tempo (Carvalho et. al., 2001).

## Tecnologia de tratamento e de controlo de emissão

Uma combustão eficaz fornece os meios mais importantes de redução das emissões dos compostos orgânicos, particularmente das dioxinas e furanos.

Actualmente as emissões das dioxinas e furanos são muito baixas, consequência da legislação em vigor, que impõe condições rigorosas de combustão dos RSU, nomeadamente a temperatura e o tempo de permanência, prevenindo assim a formação de tais compostos. É possível reduzir as emissões de dioxinas e furanos em fontes fixas ao valor limite de 0,1 ng/Nm<sup>3</sup> a 11 % de O<sub>2</sub>, constante da Directiva n.º 2010/75/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 24 de Novembro de 2010, relativa à incineração de resíduos, com a optimização dos processos de incineração implícitos (tempo de permanência de 2 segundos e uma temperatura mínima de 850 °C para resíduos não perigosos e 1100 °C para resíduos perigosos) e a adopção de sistemas de tratamento de gases (Cabrita *et. al.*, 2003).

A técnica mais eficiente para a remoção das dioxinas e furanos dos gases de combustão é através do mecanismo de adsorção com carvão activado. Uma combinação de *scrubbers*, filtros de mangas e injeção deste adsorvente, tem sido uma técnica muito eficaz no controlo destes poluentes (BREF, 2006).

### 3.6 Gases ácidos

Nas centrais de incineração de RSU consideram-se gases ácidos, o NO<sub>x</sub>, o SO<sub>2</sub>, o HCl e o HF. A formação dos gases ácidos durante a incineração está relacionada com vários parâmetros dos quais os mais importantes são, a composição e a humidade dos RSU, as condições operatórias, nomeadamente a temperatura de combustão e o excesso de ar (Wey *et. al.*, 2005). Nesta secção apresenta-se uma análise de como estes parâmetros contribuem para a formação destes gases, as tecnologias utilizadas para o controlo e tratamento dos mesmos e os impactos ambientais causados por estes.

#### 3.6.1 HCl, SO<sub>2</sub> e HF

- **HCl**

A formação do HCl deve-se à presença nos RSU, de cloretos orgânicos, como o PVC, e de cloretos inorgânicos, como por exemplo o cloreto de sódio (NaCl), o cloreto de potássio (KCl) e o cloreto de cálcio (CaCl<sub>2</sub>), provenientes de certos alimentos. Neste sentido, a incineração de RSU com elevado teor em plásticos e em “restos de comida”, constitui um dos principais factores para a formação do HCl.

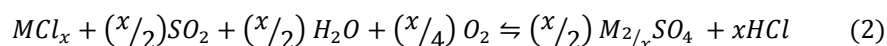
O mecanismo de formação deste composto é um processo complexo que envolve a disponibilidade de cloro, as fontes de oxigénio e a afinidade competitiva dos metais pesados, presentes nos RSU. Como referido no capítulo anterior, os metais pesados, principalmente o Hg, podem reagir com o ião cloreto e formar HgCl<sub>2</sub>. Neste sentido, a presença deste metal no fluxo gasoso, contribui para uma diminuição da concentração do cloro e consequentemente a disponibilidade do mesmo no fluxo. Geralmente a afinidade do hidrogénio com o cloro é maior

do que a do cloro com os metais pesados. Uma elevada concentração de hidrogénio no fluxo dos gases, (acontece quando os RSU estão muito húmidos), aumenta a potencialidade de formação do HCl (Wey *et. al.*, 2005). Portanto, RSU com alto teor em humidade possuem maior potencial de emissão dos gases HCl. A humidade dos RSU aumenta sobretudo no inverno, onde a chuva é mais frequente e intensa. Logo, nesta altura do ano a formação deste gás é, em princípio, mais elevada.

À temperaturas elevadas, quer a partir dos cloretos orgânicos, quer inorgânicos, ocorre a libertação do ião  $\text{Cl}^-$  que reage posteriormente com iões de hidrogénio, ( $\text{H}^+$ ), formando HCl e outros compostos organoclorados tais como, clorofenóis e clorobenzenos, quando a reacção de combustão for incompleta (Wey *et. al.*, 2007). Os clorofenóis e clorobenzenos, como já foi visto, constituem os principais precursores para a formação das dioxinas e furanos. Neste sentido um controlo eficaz, do HCl, ajuda a prevenir também a formação destes compostos.

Alguns trabalhos, (por exemplo o do Wey *et. al.*, 2007), indicam que durante a queima de RSU, os materiais orgânicos têm maior influência na emissão de HCl do que os compostos inorgânicos. Isto deve-se ao facto dos cloretos orgânicos oferecerem mais iões cloretos para a formação do HCl, do que os cloretos inorgânicos. Tendo em conta que os cloretos inorgânicos são compostos iónicos, estes possuem ligação mais forte do que os orgânicos, com ligação covalente, onde é mais fácil a libertação do cloro. Um outro aspecto que contribui para menor formação do HCl a partir dos compostos inorgânicos é o facto de, o NaCl ter a particularidade em relação aos outros cloretos, de não se decompor totalmente, ou de se decompor lentamente, fazendo com que parte do NaCl seja removida nas escórias, durante a incineração. Sendo assim, nem todo o NaCl presente nos RSU, liberta cloro para a formação do HCl. (Wey *et. al.*, 2005).

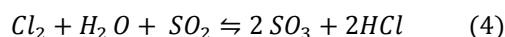
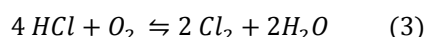
Trabalho de investigação como o do Matsuda *et. al.* (2004), mostra que a presença de água, oxigénio e de dióxido de enxofre no fluxo dos gases, interagem com os cloretos inorgânicos, ( $\text{KCl}$ ,  $\text{NaCl}$  e  $\text{CaCl}_2$ ), originando sulfatos metálicos e libertando  $\text{Cl}_2$  e HCl. Estas reacções são denominadas de sulfonação de cloretos inorgânicos. Como exemplo de uma reacção deste tipo, considerou-se a equação que se segue:



Onde o  $M$  representa o metal Na (sódio), K (potássio) e Ca (cálcio) e  $x$  representa o coeficiente estequiométrico ( $x = 1$  se o metal for Na ou K e  $x = 2$  se o metal for Ca).

Segundo Matsuda *et. al.* (2004) a constante de velocidade da reacção de sulfonação dos cloretos inorgânicos, ( $k$ ), é favorecida por temperaturas acima dos 923K. Contudo, Wey *et. al.* (2005) demonstraram que, o aumento da temperatura diminui a formação do HCl, tendo em conta que a constante de equilíbrio de formação do HCl, ( $K_p$ ), também diminui. Ou seja, quanto maior for a temperatura menor é a constante de formação do HCl, a reacção é deslocada no sentido dos reagentes, verificando-se também o contrário.

Para além das reacções acima apresentadas, destaca-se ainda a reacção de oxidação do HCl em  $Cl_2$ , também conhecida por reacção de *Deacon*, de acordo com as equações que se seguem:



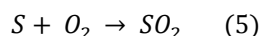
Estas reacções são favorecidas por temperaturas abaixo dos 873 K e têm a sua relevância na incineração dos RSU tendo em conta que, a formação do cloro favorece posteriormente a formação das dioxinas e furanos, por meio de formação dos referidos precursores, para além de originar novamente o HCl, de acordo com a reacção 4 (Matsuda et. al., 2004).

Concluindo, a formação do HCl é favorecida por resíduos húmidos e com presença de cloretos maioritariamente orgânicos, ou seja RSU com alta concentração de plásticos de diversos tipos, principalmente o PVC. A queima de RSU a elevadas temperaturas, favorece a libertação do cloro, a partir destes materiais, que reage posteriormente com o hidrogénio proveniente da água contida nos resíduos, para formar o tal composto. No entanto, o HCl pode ser formado também a partir de cloretos inorgânicos, (NaCl, KCl e CaCl), normalmente presentes em RSU ricos em restos de alimentos, através da reacção de sulfonação, quando é garantido a presença de enxofre, oxigénio e água no fluxo gasoso.

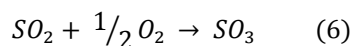
- **SO<sub>2</sub>**

A maior fonte de produção do SO<sub>2</sub> é a combustão de combustíveis fósseis em processos industriais e na produção de electricidade. A incineração de RSU é um baixo emissor de SO<sub>2</sub>, tendo em conta o baixo teor de enxofre contido nos resíduos a incinerar e a eficiência do método de tratamento dos gases. Por outro lado, o gás natural, combustível auxiliar utilizado correntemente no processo de incineração de resíduos, também contém um baixo teor de enxofre.

Sabe-se que nos RSU podem existir alguns materiais que contêm enxofre na sua constituição nomeadamente o papel e o plástico. Durante o processo de queima pode ocorrer a libertação deste composto, a altas temperaturas, nomeadamente acima dos 1000 °C, que reage posteriormente com o ar atmosférico, produzindo SO<sub>2</sub>, de acordo com a seguinte equação:

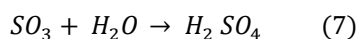


O SO<sub>2</sub> formado pode reagir novamente com o oxigénio do ar para formar trióxido de enxofre, (SO<sub>3</sub>), embora em poucas quantidades, através da seguinte reacção (BREF, 2006; Zandaryaa e Buekens):



Esta reacção é favorecida por temperaturas compreendidas entre os 400 a 450 °C (Martins, 2011) e catalisada por partículas e outras impurezas gasosas presentes no fluxo gasoso.

Neste sentido, a formação de SO<sub>2</sub> depende do teor de enxofre nos resíduos, da concentração do oxigénio local e da temperatura de queima. Um controlo eficaz destes parâmetros ajuda a prevenir a formação deste gás. A redução do excesso de ar diminui a quantidade de O<sub>2</sub> disponível para a oxidação do SO<sub>2</sub> a SO<sub>3</sub>, prevenindo assim a formação do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, através da reacção do SO<sub>3</sub> com vapor de água, de acordo com a reacção que se segue:



A formação do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> tem como consequência a corrosão dos equipamentos e possível emissão deste composto para o meio ambiente, com consequências ambientais adversas (Zandaryaa e Buekens).

- **HF**

O mecanismo de formação do HF é idêntico ao do HCl, sendo as principais fontes deste poluente, os plásticos ou os têxteis que contenham flúor. A emissão do HF nas centrais de incineração normalmente é baixa, devido também a baixa concentração de materiais fluorados nos RSU. A concentração do HF é medido continuamente nas centrais de incineração e a gama de emissão deste poluente é cerca de 0.1 a 1 mg/Nm<sup>3</sup> (BREF, 2006).

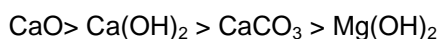
### 3.6.1.1 Tecnologia de tratamento e de controlo de emissão

O tratamento dos gases ácidos nas centrais de incineração é feito em simultâneo, utilizando-se as mesmas tecnologias.

A redução de emissão do HCl SO<sub>2</sub> e HF pode ser feita por adição de aditivos alcalinos, tais como, os hidróxidos e carbonatos de sódio, cálcio e de magnésio. As bases de cálcio mais utilizadas são, o hidróxido de cálcio [Ca(OH)<sub>2</sub>], o óxido de cálcio (CaO) e o carbonato de cálcio [CaCO<sub>3</sub>] e a base de magnésio mais utilizada é o hidróxido de magnésio [Mg(OH)<sub>2</sub>].

Vários estudos, (por exemplo, Wey et. al., 2005 e Wey et. al., 2007), procuraram perceber a eficácia dos vários aditivos referidos anteriormente na inibição de formação dos gases ácidos, principalmente na do HCl.

Segundo Wey et. al. (2005), num estudo realizado em fornos de incineração de leito fluidizado, onde se introduz aditivos juntamente com os resíduos a incinerar, para o controlo de emissão do HCl e Cl<sub>2</sub>, chegaram a conclusão que os aditivos à base de cálcio apresentam melhores desempenhos do que os aditivos à base de magnésio. Descreverem a seguinte ordem de desempenho destes aditivos:



De acordo com o referido estudo, o aditivo CaO apresenta maior potencial de inibição na formação do HCl e Cl<sub>2</sub> do que os restantes aditivos, tendo em conta que este reage directamente com o HCl e Cl<sub>2</sub>, para formar CaCl<sub>2</sub>, enquanto que o Ca(OH)<sub>2</sub>, o CaCO<sub>3</sub> e o Mg(OH)<sub>2</sub>, decompõem-se primeiramente em CaO e MgO, respectivamente, a altas temperaturas, para posteriormente reagirem com o HCl e Cl<sub>2</sub> (Wey et. al., 2005). Além disto, este aditivo possui maior afinidade com HCl, do que com os outros gases de combustão

(nomeadamente o  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{CO}_2$ , entre outros), sendo por isso muito utilizado no controlo deste gás.

Wey et. al. (2005), também estudaram a influência da temperatura no desempenho dos aditivos e concluíram que em geral o desempenho destes diminui, quando a temperatura aumenta, tendo em conta que a formação do  $\text{HCl}$  e  $\text{Cl}_2$  também aumenta. Neste sentido, a temperatura é um parâmetro importante no controlo da formação e remoção do  $\text{HCl}$ . No entanto, por razões regulamentares, devidas à necessidade de uma destruição eficaz de outros poluentes como as dioxinas e furanos, é exigido que a incineração de RSU ocorra a uma temperatura mínima de  $850^\circ\text{C}$ . Por outro lado no que diz respeito à remoção do  $\text{HCl}$  formado, são utilizadas determinadas medidas que regulam a temperatura da reacção de neutralização do  $\text{HCl}$  com os aditivos, de modo a aumentar a eficiência da referida reacção, como será detalhado mais à frente neste trabalho.

A adição dos referidos aditivos pode ser feita directamente nos RSU a incinerar ou no fluxo dos gases de combustão. No segundo caso, o estado físico em que as bases são adicionadas, caracteriza os sistemas de tratamento existentes. São elas: sistema húmido, semi-húmido/semi-seco ou seco (BREF, 2006). Dependendo do sistema, os produtos da reacção podem ser sais dissolvidos e secos. Os sistemas de tratamento podem ser regeneráveis, em que há recirculação dos aditivos ou de passagem única onde não existe recirculação dos aditivos. O sistema semi-húmido é um exemplo de um sistema regenerável. Estes sistemas são mais eficientes mas, menos económicos do que os de passagem única (Cardoso, 2010). Neste trabalho é analisado apenas os sistemas de passagem única, ou seja, sem recirculação dos aditivos.

- **Sistema de tratamento húmido**

No sistema de tratamento húmido, o reagente utilizado é um líquido, podendo ser água, suspensão de carbonato de cálcio, leite de cal, hidróxido de sódio (soda cáustica), e o produto da reacção também é líquido.

Neste processo os gases de combustão são arrefecidos abaixo do ponto de orvalho e os gases ácidos condensados são lavados, utilizando uma suspensão de um dos reagentes mencionados anteriormente. São utilizados *scrubbers* de diferentes tipos, tais como, a jacto, de rotação, de *venturi*, de pulverização, de torre seca, entre outros, colocados após o sistema de remoção das partículas (filtros de mangas).

O sistema de lavagem dos gases ácidos é feito normalmente em dois estágios. No primeiro estágio são removidos os gases  $\text{HCl}$  e  $\text{HF}$ , onde o reagente pode ser água e o efluente resultante desta fase é recirculado sucessivamente para os *scrubbers* juntamente com uma pequena quantidade de água fresca, para manter a eficiência de remoção dos referidos gases. A solução resultante é bastante ácida (pH entre 0 a 1). No segundo estágio procede-se à remoção do  $\text{SO}_2$ , tendo em conta que no primeiro a deposição do  $\text{SO}_2$  é baixa. A remoção do  $\text{SO}_2$  é feita num sistema de lavagem com controlo do pH próximo do neutro ou alcalino

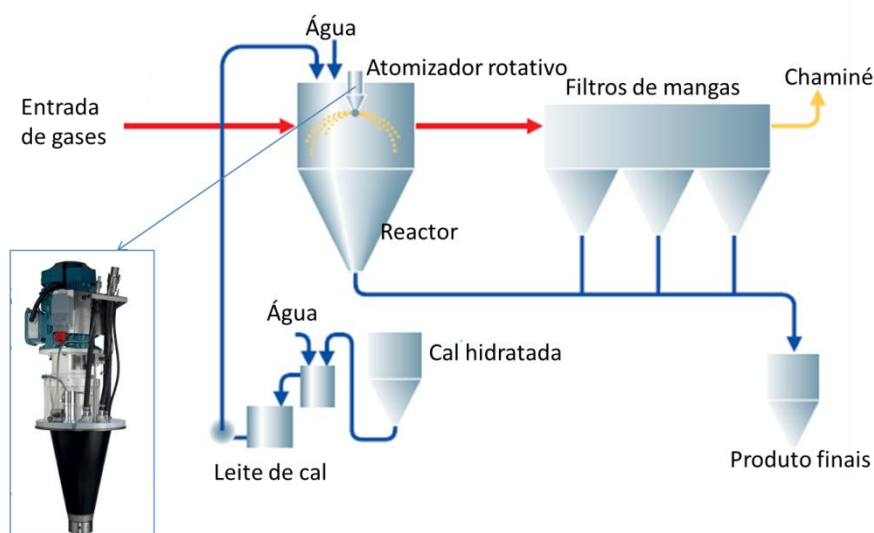
(geralmente pH entre 6 a 7), em que é adicionada uma solução de soda cáustica ou leite de cal.

Se o processo de neutralização dos gases ácidos for feito com solução de leite de cal, formam-se compostos insolúveis tais como sulfatos (gesso), carbonatos e fluoretos, que se acumulam posteriormente nas águas residuais de uma central de incineração. Estes compostos têm que ser posteriormente removidos para evitar-se incrustações nos equipamentos de lavagem (*scrubbers*). Se o reagente de neutralização for soda cáustica, esta situação não se verifica porque os produtos da reacção são solúveis na água (BREF, 2006).

- **Sistema de tratamento semi-húmido**

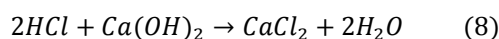
No sistema de tratamento semi-húmido o reagente utilizado é uma solução/suspensão aquosa, geralmente, de leite de cal e o produto da reacção é um sólido seco. Este tratamento ocorre num reactor, também designado de depurador, contendo um aparelho no topo, designado de atomizador, para atomizar a solução do leite de cal, conforme o ilustrado na Figura 10. A referida solução é atomizada e doseada, em forma de *spray*, no fluxo dos gases de combustão que entra no reactor e a água da solução é evaporada por acção do calor dos gases e condensa. O leite de cal, para além de condicionar os gases, aumenta a humidade e reduz a temperatura no interior do reactor, aumentando assim a eficiência da reacção de neutralização. Os produtos da reacção apresentam-se na forma seca e são depositados a partir dos gases de combustão como partículas e removidas posteriormente nos filtros de mangas (BREF, 2006).

A figura que se segue ilustra o mecanismo típico de um sistema semi-húmido:

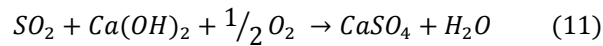
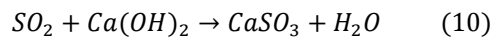
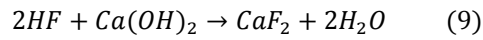


**Figura 10:** Representação esquemática do sistema de tratamento semi-húmido dos gases ácidos. (Adaptada de GEA Niro, 2014)

As equações que traduzem as reacções químicas de neutralização dos gases ácidos com o leite de cal são as que se seguem (Valorsul, 2013a)<sup>5</sup>:



<sup>5</sup> Valorsul, (2013a). "Relatório Ambiental Anual relativo à exploração da CTRSU, Relatório ano 2012". Valorsul, Lisboa.



Estas reacções são mais eficientes a temperaturas baixas. Matsuda et. al. (2004), concluíram através de um estudo, que o controlo de emissão dos gases ácidos, principalmente do HCl, através do método de absorção em leite de cal, é pouco eficiente a temperaturas acima dos 1073 K, devido ao aumento da dessorção do HCl a partir do  $CaCl_2$ . Reportaram ainda que apenas 30% de conversão do leite de cal foi possível aos 1073 K e uma conversão inferior a 5% foi obtida a uma temperatura de 1273 K.

Neste sentido, para se conseguir elevadas conversões no reactor e aumentar a eficiência da reacção de neutralização, é necessário baixar a temperatura dos gases no interior do reactor. A diminuição da temperatura é feita por meio de adição de água dentro do reactor o que faz com que, neste processo de tratamento, haja um consumo de água aumentando portanto, os custos de operação deste processo (BREF, 2006; Cardoso, 2010).

- **Sistema de tratamento seco**

Neste sistema de tratamento o reagente utilizado é seco como por exemplo, o calcário ou bicarbonato de sódio e o produto da reacção também é seco.

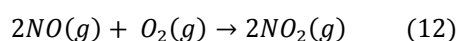
Para este tipo de tratamento utiliza-se um reactor onde o reagente é introduzido em forma de pó. Os produtos da reacção são sólidos e são depositados a partir dos gases de combustão como partículas e removidos posteriormente nos filtros de mangas. A quantidade do reagente a ser utilizada depende normalmente da temperatura da reacção e do tipo do reagente. Se o reagente utilizado for a cal, a quantidade a ser utilizada é duas ou três vezes superior à quantidade estequiométrica. Para o caso do bicarbonato de sódio esta quantidade é menor, embora seja necessário na mesma a adição de um excesso. Esta sobredosagem dos reagentes é feita para garantir que valores limites de emissões dos gases ácidos sejam cumpridos. A utilização de reagentes em excessos origina um aumento de resíduos produzidos. No entanto, estes reagentes podem ser recirculados para o processo, de modo a evitar acumulações e diminuir a quantidade de injeção fresca dos mesmos (BREF, 2006).

Concluindo, dos três processos de tratamento dos gases ácidos referidos anteriormente, o sistema de tratamento húmido é o mais eficiente contudo, apresenta custos adicionais uma vez que, associado a este processo tem-se o processo de tratamento das águas residuais, devido à deposição de sais insolúveis formados durante o processo de lavagem dos gases. Este processo é utilizado tipicamente em grandes instalações de incineração, devido ao alto custo de investimento. O processo de tratamento semi-húmido, o mais utilizado sobretudo em Portugal, apresenta razoáveis eficiências de remoção contudo, tem como desvantagens um elevado consumo energético para atomizar a solução de leite de cal e o facto de o atomizador sofrer entupimentos facilmente. Também há um consumo adicional de água para o

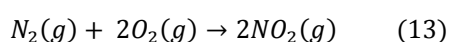
arrefecimento dos gases no reactor. O processo seco apresenta desvantagens de acumulação de resíduos devido a sobredosagem da cal. No entanto, é o processo ideal para pequenas instalações de incineração devido ao seu baixo custo de investimento, fácil instalação e baixo consumo de água e electricidade (BREF, 2006; Cardoso, 2010).

### 3.6.2 NO<sub>x</sub>

São emitidos vários óxidos de azoto das unidades de incineração de RSU tais como: monóxido de azoto (NO); dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>); óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), entre outros. No entanto, o monóxido de azoto (NO) e o dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>) são os mais relevantes. Geralmente utiliza-se o termo NO<sub>x</sub> para designação dos gases NO e NO<sub>2</sub>. A quantidade do NO formado é superior á do NO<sub>2</sub>. A proporção do NO/NO<sub>2</sub> do total das emissões de NO<sub>x</sub> é, geralmente, aproximada a 95% de NO e 5% de NO<sub>2</sub>. O NO<sub>2</sub> é um produto secundário e é formado por oxidação do NO durante o processo de combustão a temperatura abaixo dos 800°C, de acordo a seguinte reacção:



Pode-se formar dióxido de azoto também a partir da reacção do oxigénio com azoto, pela seguinte equação:



A formação dos óxidos de azoto no processo de incineração de RSU está relacionada com a temperatura de combustão, com o fluxo de ar fornecido para a queima dos resíduos e com o teor de azoto contido nos materiais a serem incinerados (BREF, 2006; Júnior e Teixeira, 2003). Neste sentido destacam-se três principais vias de formação dos gases NO<sub>x</sub>:

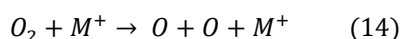
- a) Formação do NO<sub>x</sub> - térmico, através da oxidação do azoto molecular do ar com o oxigénio do ar de combustão, a temperaturas elevadas (1200°C);
- b) Formação do NO<sub>x</sub> - combustível, a partir dos azotos presente nos combustíveis a serem incinerados, que neste caso são os RSU;
- c) Formação de NO<sub>x</sub> - imediato (*NO<sub>x</sub> prompt*), a partir de radicais de hidrocarbonetos.

De notar que, como os gases NO<sub>x</sub> são constituídos maioritariamente pelo gás NO, atribui-se uma importância especial sobre o mesmo, ao longo das descrições das três vias de formação do NO<sub>x</sub>, a seguir descritas.

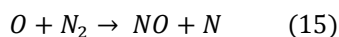
#### a) Formação do NO<sub>x</sub> - térmico

A formação do NO<sub>x</sub> térmico refere-se à formação do gás por oxidação do azoto do ar a altas temperaturas, geralmente acima dos 1200°C. Nestas condições o oxigénio e o azoto do ar dissociam-se nos seus estados atómicos e participam numa série de reacções. A taxa de formação do NO depende da temperatura e do tempo de residência do azoto a esta temperatura (May, 2012).

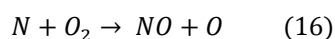
O mecanismo de formação do NOx térmico é ilustrado nas reacções que se seguem, conhecidos também por mecanismos de Zeldovich de formação de NO:



A equação 14 corresponde à reacção de dissociação do O<sub>2</sub>, Onde M<sup>+</sup> é uma molécula estável de alta energia, necessária para quebrar as ligações de oxigénio.



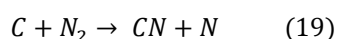
A equação 15 corresponde à reacção do átomo de oxigénio com a molécula de azoto. Nesta reacção o azoto elementar (N) libertado, reage rapidamente com o O<sub>2</sub>, através da seguinte reacção, (equação 16):



Estas reacções, (equações 14, 15 e 16), são mais significativas para temperaturas compreendidas entre os 1200°C a 1500 °C, para que haja ruptura da molécula N<sub>2</sub> em átomos de N. Neste sentido, este mecanismo de formação normalmente tem pouca importância na incineração dos RSU, onde a temperatura de combustão é geralmente inferior a 1050 °C (May, 2012).

#### b) Formação do NOx – imediato (*prompt*)

A formação do NOx a partir de radicais livres, tais como: C, CH, CH<sub>2</sub>, entre outros fragmentos derivados do combustível, (que neste caso são os RSU), ocorre numa primeira fase de combustão, o que resulta na formação de espécies de azotos fixos, de acordo com as seguintes reacções:



Estas espécies de azotos fixos, HCN, NH e CN, são rapidamente oxidados a NO. Este mecanismo depende sobretudo do ataque das moléculas de azoto por radicais dos hidrocarbonetos a altas temperaturas, geralmente superior a 1200 °C. Portanto, tal como o caso do NOx - térmico, este processo tem relativamente pouca importância na incineração de resíduos onde a temperatura de combustão é geralmente inferior a 1050°C. Em combustíveis que contêm azotos, a taxa de formação do NOx por esta via é relativamente mínima. (Rogaume et. al., 2002; May, 2012).

#### c) Formação do NOx - combustível

Os RSU são compostos por vários materiais que contêm azoto na sua constituição nomeadamente, plásticos (produtos em PVC e polietileno de baixa densidade, PEBD), papéis/ cartões, tintas, entre outros. O teor de azoto típico dos RSU é de 0,45 % em peso. Os plásticos

e papéis apresentam um teor de azoto que varia entre 0,3 a 0,85% em peso e 0,11 a 0,8% em peso, respectivamente (Rogaume et. al., 2002).

A formação do NO<sub>x</sub> - combustível ocorre através da conversão do azoto ligado ao combustível (RSU), durante a combustão. Normalmente assume-se uma taxa de conversão de 10 a 20% do azoto contido nos RSU, dependendo do tipo de resíduo a incinerar.

Nos RSU encontram-se, frequentemente, vestígios de substâncias como poliamidas, (por exemplo o Nylon 6), em certos vestuários e polietileno tereftalato, (PET), encontrado em garrafas de refrigerantes e garrafas de água. No entanto, com excepção das poliamidas cuja estrutura molecular contém o azoto na sua constituição, o PET não possui tal átomo na sua estrutura. O azoto contido neste material tem origem a partir da composição de certos ingredientes, tais como, os plastificantes, os estabilizadores, os diluentes, pigmentos, entre outros.

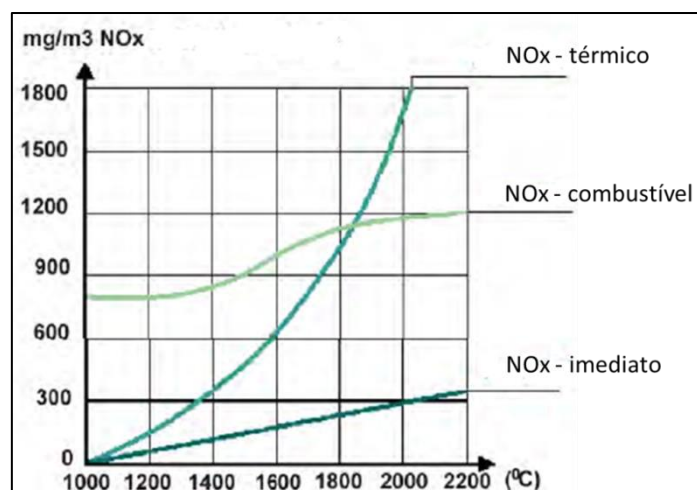
A formação do NO<sub>x</sub> – combustível a partir de papéis e cartões é maior do que a formação do mesmo a partir dos materiais em PVC e PEBD. Isto está relacionado com algumas diferenças nas propriedades físicas e químicas destes materiais, como por exemplo a composição química e a facilidade de libertação do átomo de azoto contido nos referidos materiais.

Os materiais em PVC e PEBD contêm elevada concentração de cloro na sua constituição, relativamente à concentração do azoto, o que os diferencia dos restantes materiais (papéis e cartões). O azoto contido nos materiais em PVC e PEBD tem a mesma origem dos materiais em PET, visto que os polímeros originais não contêm azoto nas suas estruturas. A pouca libertação do azoto volátil contido nos materiais em PVC e PEBD, explica a baixa formação dos gases NO<sub>x</sub> - combustível a partir destes compostos (Glarborg et. al., 2001; Rogaume et. al., 2002).

Durante a queima dos RSU o azoto é libertado dos referidos materiais, como radicais livres, e reagem posteriormente com oxigénio do ar formando N<sub>2</sub> livre ou NO. O mecanismo de formação do NO<sub>x</sub> a partir do combustível, não é totalmente conhecido. No entanto, consideram-se dois caminhos para a formação do NO<sub>x</sub> por este mecanismo: O primeiro caminho é a oxidação de espécies de azotos voláteis contidos nos materiais a incinerar. Numa primeira fase de combustão, estes compostos libertam-se e reagem formando vários intermediários que são oxidados posteriormente a NO. Se a atmosfera onde ocorre a reacção for redutora, o azoto envolvido pode ser facilmente transformado em gás de azoto em vez de NO. O segundo caminho envolve a combustão do azoto contido na matriz dos materiais a incinerar (May, 2012).

A formação do NO<sub>x</sub> – combustível é considerada a principal via de produção do NO durante a incineração de RSU.

A Figura 11 ilustra a emissão dos gases NO<sub>x</sub> a partir dos três mecanismos referidos anteriormente:



**Figura 11:** Emissão dos gases NOx a partir do NOx-térmico, combustível e imediato (Adaptada de Stubenvol et. al., 2002).

Como se pode observar, a emissão do NOx a partir do NOx – combustível é superior às emissões do NOx - térmico e NOx – imediato, por razões já mencionadas anteriormente. As emissões do NOx-térmico e imediato são mais acentuadas a partir dos 1200 °C, enquanto a emissão do NOx-combustível aos 1000 °C já é bastante acentuada. Mais de 95% do NO é formado a partir do mecanismo de NOx-combustível (Rogaume et. al., 2002).

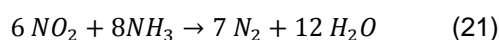
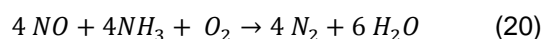
### 3.6.2.1 Tecnologia de tratamento e de controlo de emissão

Uma das melhores formas de controlo das emissões do NOx é a prevenção da sua formação durante a incineração dos resíduos. A prevenção passa pela optimização do processo de combustão, nomeadamente o controlo da temperatura e redução da concentração do oxigénio local. A triagem e separação dos papéis, cartões e plásticos, que podem ser reciclados, contribuem eficazmente para redução de formação do NOx – combustível, tendo em conta que reduz os materiais que possuem azoto na sua constituição.

No entanto, para a redução dos gases NOx já formados, utiliza-se normalmente o mecanismo de Redução Catalítica Selectiva, (RCS), ou Redução Não Catalítica Selectiva, (RNCS), em que o agente redutor, geralmente, é uma solução aquosa de amoníaco ou ureia a 25%, por questões de segurança (BREF,2006). As reacções são selectivas porque o agente redutor reage primeiro com o NOx e não com o O<sub>2</sub> ou outro componente qualquer. Neste trabalho avalia-se a redução dos gases NOx com a amónia, tendo em conta que é o agente redutor utilizado pela unidade de incineração em estudo.

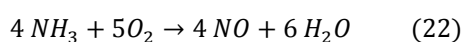
- **Processo de redução não catalítica selectiva - RNCS**

Neste processo a amónia é introduzida no fluxo dos gases de combustão a uma temperatura de cerca de 1000°C, reagindo com os gases NOx, formando azoto e vapor de água, de acordo com as seguintes equações químicas:



A temperatura da reacção situa-se por volta dos 850 a 1000°C. A eficiência de redução típica deste processo é cerca de 50 a 60%. Para se conseguir eficiências elevadas, 60 a 80%, é necessário utilizar-se grandes quantidades de amónia, resultando na fuga deste composto para o fluxo dos gases de combustão e cinzas volantes. Este fenómeno resulta em problemas de toxicidade e corrosão dos equipamentos, além da emissão do gás NH<sub>3</sub> para atmosfera.

Paralela à reacção de redução do NO<sub>x</sub>, ocorre também a reacção de combustão do NH<sub>3</sub> formando NO<sub>x</sub> e vapor de água, de acordo com a seguinte equação química:



Neste sentido, o excesso de amónia é necessário para se garantir a redução não só dos gases de NO<sub>x</sub> formados mas também dos formados através da reacção de combustão do NH<sub>3</sub>.

No caso de se utilizar a ureia como agente redutor, leva a emissões relativamente elevadas de óxidos nitrosos (N<sub>2</sub>O), devido a combustão da ureia a elevadas temperaturas, em comparação com a redução através do amoníaco.

As reacções de redução dos gases NO<sub>x</sub> e de combustão do NH<sub>3</sub> ocorrem em simultâneo, o que leva o processo de RNCS a depender fortemente da temperatura dos gases de combustão. Se a temperatura diminuir os óxidos de azoto não são suficientemente reduzidos e a fuga da amónia aumenta. Por outro lado, se a temperatura for muito elevada, acima dos 1200 °C, ocorre a combustão do NH<sub>3</sub> e conseqüentemente a concentração do NO<sub>x</sub> aumenta. Para se garantir uma dosagem óptima da amónia a diferentes variações da carga térmica, que causam variações de temperaturas na câmara de combustão, a amónia é injectada a vários níveis da caldeira de produção de vapor, (ver Figura 12), procurando assim, que a reacção de redução ocorra a temperaturas adequadas. Quando a combustão é mais “forte”, a temperatura dos gases de combustão é mais elevada a níveis inferiores da caldeira, neste sentido a amónia é injectada a níveis superiores, onde os gases já sofreram algum arrefecimento. Por outro lado quando a combustão é mais “fraca”, a amónia é injectada a níveis mais abaixo da caldeira, onde a temperatura dos gases é mais elevada.

A optimização da dosagem do agente redutor e a gama de temperaturas a que o mesmo é injectado são importantes para se conseguir uma elevada eficiência de redução dos gases NO<sub>x</sub>. É ainda importante para a optimização do processo de RNCS uma boa mistura dos gases com o reagente, assim como um tempo de residência dos gases, que deve ser suficiente de modo a permitir que ocorram as reacções de redução do NO<sub>x</sub> (BREF, 2006).

A Figura 12 ilustra uma representação esquemática do funcionamento do sistema RNCS:

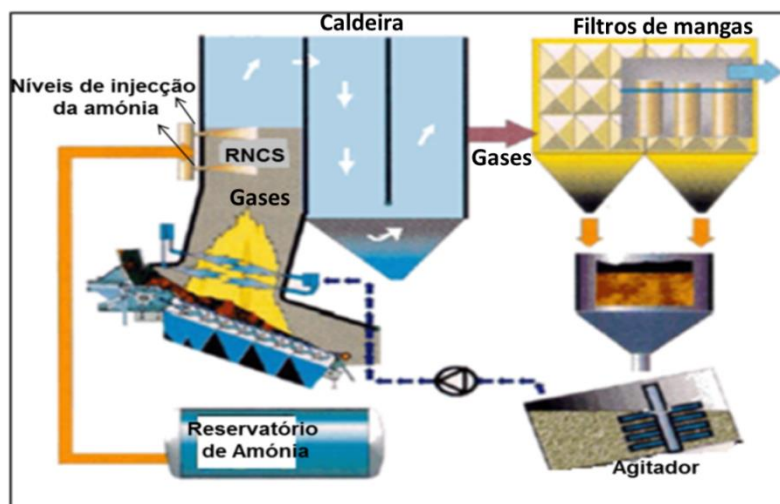


Figura 12: Representação esquemática do sistema de RNCS  
(Adaptada de BREF, 2006)

- **Processo de redução catalítica selectiva - RCS**

No processo de RCS, como o próprio nome diz, a reacção de redução dos gases NOx é catalisada por catalisadores, que habitualmente são a platina, o ródio ou zeólitos. A partir desta técnica consegue-se uma taxa de redução dos gases NOx maior que 90%. O agente redutor, amónia ou ureia, é misturado com o ar e adicionado aos gases de combustão, passando posteriormente sobre o leito do catalisador. A temperatura da reacção dos catalisadores, utilizada actualmente na maioria dos centrais de incineração, encontra-se na ordem dos 230 a 300 °C. Abaixo dos 250°C, é necessário um volume do catalisador maior e há maior risco de ocorrer entupimento e envenenamento do catalisador.

A RCS é utilizada após a limpeza dos efluentes gasosos principalmente após a remoção das partículas e gases ácidos e por isso há uma necessidade de reaquecimento dos gases de combustão até à temperatura de reacção deste sistema. Por este motivo é um processo mais dispendioso do que o processo RNCS, tanto pelo custo do catalisador como pela utilização de energia para o reaquecimento dos gases. O processo de RNCS é mais utilizado em centrais de incineração de menor porte enquanto o processo RCS é mais utilizado nas grandes instalações de incineração (BREF, 2006).

### 3.6.3 Impactos ambientais dos gases ácidos

Os gases ácidos são corrosivos e tóxicos cuja consequência de emissão merece alguma atenção, a fim de se perceber a importância do sistema de tratamento dos efluentes gasosos numa central de incineração de RSU.

O HCl e o HF em elevadas concentrações para além de, danificarem os equipamentos por corrosão numa central de incineração, têm um grande impacto no crescimento das plantas devido a alta solubilidade dos mesmos na água.

Os gases NOx e SO<sub>2</sub> são os causadores primários da chuva ácida. A chuva ácida ocorre quando estes gases reagem na atmosfera com a água, oxigénio e outros compostos. Os

óxidos de azoto reagem com a água da chuva formando o ácido nítrico, ( $\text{HNO}_2$ ), e o ácido nitroso, ( $\text{HNO}_3$ ). Os óxidos de enxofre reagem com a água formando ácidos fortes, nomeadamente o ácido sulfuroso, ( $\text{HSO}_3$ ), e ácido sulfúrico, ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). O  $\text{H}_2\text{SO}_4$  é considerado o principal composto responsável pela formação da chuva ácida. A ocorrência desta precipitação causa acidificação dos lagos e correntes de água, danifica as árvores e o solo e adicionalmente acelera a deterioração de materiais e pinturas de edifícios.

Além da chuva ácida, a acção de raios ultravioleta de origem solar sobre o  $\text{NO}_2$  contido no meio ambiente origina transformações fotoquímicas que levam à formação do ozono, um composto prejudicial à saúde pública (Júnior e Teixeira, 2003).

Um aspecto importante relacionado com a formação dos gases ácidos é a formação das dioxinas e furanos. Os gases ácidos podem participar directamente ou indirectamente na formação destes compostos, principalmente o HCl, uma vez que este actua como dador de cloro para as reacções de interacção dos precursores das dioxinas e furanos. Sendo assim, um controlo eficaz dos gases ácidos, influencia directamente numa redução de emissão de tais compostos.

### **3.7 Enquadramento regulamentar do sector de incineração de RSU**

Actualmente devido a crescente consciencialização ambiental passou a ser necessário, o desenvolvimento de leis cada vez mais rigorosas e restritas relacionadas com as actividades e emissões industriais, principalmente na área de incineração de RSU, onde são produzidos variedades de gases nocivos para a população e meio ambiente.

Neste sentido, nesta secção será abordada a legislação relacionada com a gestão dos RSU, incineração dos RSU e respectivas emissões atmosféricas.

Portugal, como Estado-Membro da União Europeia, rege-se pelas normas e leis da União Europeia, sendo as Directivas transpostas para a lei nacional através dos Decretos-Lei. No entanto, parte importante da regulamentação em aplicação em Portugal, na área da incineração de resíduos, tem origem em Directivas europeias.

- **Gestão de RSU**

Como já referido no capítulo II, a gestão dos RSU é regulamentada pelo Decreto-Lei nº 73/2011 que transpõe para o direito nacional a Directiva 2008/98/CE e que revoga o Decreto-Lei 178/2006 de 5 de Setembro. Esta regulamentação reforça a prevenção da produção de resíduos e fomenta a sua reutilização e reciclagem com vista a prolongar o seu uso na economia antes de os devolver em condições adequadas ao meio natural.

Segundo o Decreto-Lei n.º 73/2011, *“a revogação do Decreto-Lei 178/2006, surgiu com a necessidade que se tinha em clarificar conceitos-chave como a definição de resíduo, valorização e eliminação, a reforçar as medidas que devem ser tomadas em matéria de prevenção de resíduos, a introduzir uma abordagem que tenha em conta todo o ciclo de vida dos produtos e materiais e não apenas a fase de resíduo, e ainda a pôr a tónica na redução*

*dos impactos ambientais da geração e gestão de resíduos, reforçando assim o seu valor económico.”*

- **Incineração de RSU com valorização energética**

Actualmente todas as actividades relacionadas com incineração de RSU com valorização energética, encontram-se regulamentadas pelo Decreto-Lei n.º 127/2013 de 30 de Agosto que transpõe para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 2010/75/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 24 de Novembro de 2010. Este Decreto-Lei revoga o Decreto-Lei nº 85/2005 de 28 de Abril, sobre a incineração e co-incineração de resíduos. O referido Decreto-Lei, relativo às emissões industriais, tem como objectivo a *“prevenção ou, tanto quanto possível, a redução ao mínimo os seus efeitos negativos no ambiente, em especial a poluição resultante das emissões para a atmosfera, para o solo e para as águas superficiais e subterrâneas, bem como os riscos para a saúde humana”*. Nele encontram-se estabelecidas todas regras de funcionamento de uma instalação de incineração, desde a recepção dos RSU à gestão dos resíduos produzidos. Também são especificadas os Valores Limites de Emissões, (VLE), para as emissões atmosféricas (parte 2 do anexo VI), bem como os procedimentos de monitorização das mesmas, (partes 4 e 6, do mesmo anexo).

- ✓ Licenciamento da actividade de incineração de RSU

*“A actividade de incineração de resíduos está sujeita a licenciamento pela Agência Portuguesa do Ambiente, APA, I.P., ao abrigo do Decreto-Lei 127/2013, Capítulo IV, aplicando-se subsidiariamente o disposto no Capítulo III do Decreto-Lei n.º 178/2006, na redacção conferida pelo Decreto-Lei n.º 73/2011.”*

O licenciamento da operação de incineração de resíduos envolve a decisão sobre a autorização da instalação associada ao desenvolvimento da operação e a vistoria em momento anterior à emissão de decisão final sobre a autorização do desenvolvimento da operação de gestão de resíduos em apreço. (APA, 2014).

A CTRSU da Valorsul dispõe de uma licença de exploração (LE), ref. n.º 6/2008/DOGR, de 19 de Fevereiro de 2008 e uma licença ambiental (LA), ref. n.º 97/2007, de 31 de Dezembro de 2007. A LA tem associados limites de emissão faseados, sendo que desde 1 de Janeiro de 2010 esses limites são equivalentes aos da BAT (*Best Available Technologies*) conforme estipulado no BREF relativo à incineração (*Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration*) de Agosto de 2006 (Valorsul, 2014a).

- ✓ Valores limites de emissão (VLE) dos efluentes gasosos

Segundo Decreto-Lei nº 127/2013, VLE é a *“massa de um poluente atmosférico, expressa em termos de determinados parâmetros específicos, em concentração, percentagem e ou nível de uma emissão que não deve ser excedida durante um ou mais períodos determinados e calculada em condições normais de pressão e temperatura.”*

A imposição dos VLE visa assegurar a protecção da saúde humana e do ambiente, constituindo um instrumento essencial da política de prevenção e controlo do ambiente atmosférico. A sua definição tem em conta a existência de tecnologia adequada que permita o seu cumprimento (CCDR, 2014).

Na tabela que se segue, tabela 5, encontram-se os VLE da legislação em vigor, Decreto-Lei nº 127/2013, para os diversos poluentes referidos anteriormente assim como os períodos de tempo:

**Tabela 5:** VLE dos efluentes gasosos provenientes de centrais de incineração de RSU com valorização energética

Poluentes	Médias diárias (mg/Nm <sup>3</sup> )	Médias semi-horárias intervalo de 30 minutos (mg/Nm <sup>3</sup> )	
		100 % (A) <sup>6</sup>	97% (B) <sup>7</sup>
Monitorização contínua			
Partículas totais	10	30	10
COT <sup>8</sup>	10	20	10
HCl	10	60	10
HF	1	4	2
SO <sub>2</sub>	50	200	50
NO <sub>2</sub> (NO +NO <sub>2</sub> ) <sup>9</sup>	200	400	200
NO <sub>2</sub> (NO +NO <sub>2</sub> ) <sup>10</sup>	400	-	
CO	50	100/150 <sup>11</sup>	
Monitorização descontínua			
Poluentes	VLE médio obtido durante um período de amostragem mínimo de 30 minutos e máximo de 8 horas (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>12</sup>	VLE médio durante um período de amostragem mínimo de 6 horas e máximo de 8 horas (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>13</sup>	
Cd +Pb e os seus componentes	0.05	-	
Hg e os seus componentes	0.05	-	
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V e os seus componentes	0.5	-	
Dioxinas e furanos (ng/Nm <sup>3</sup> )	-	0.1	

O VLE médio diário corresponde aos valores médios de emissão dos gases durante 24h (período de funcionamento da instalação) e o VLE médio a intervalo de 30 minutos corresponde aos valores médios de emissão durante 30 minutos.

<sup>6</sup> 100% das médias a intervalos de trinta minutos: nenhuma média pode ultrapassar o valor definido na tabela 5.

<sup>7</sup> 97% das médias a intervalos de trinta minutos têm que ser inferior aos valores definidos na tabela 5; 3 % podem ser superiores.

<sup>8</sup> Substâncias orgânicas em forma gasosa e de vapor, expressas como carbono orgânico total.

<sup>9</sup> Relativamente a instalações de incineração de resíduos existentes de capacidade instalada superior a 6 toneladas por hora ou a instalações de incineração de resíduos novos.

<sup>10</sup> Relativamente a instalações de incineração de resíduos existentes de capacidade instalada igual ou inferior a 6 toneladas por hora.

<sup>11</sup> Em valor médio a intervalos de 10 minutos.

<sup>12</sup> Estes valores médios abrangem também as formas gasosas e de vapor das emissões de metais pesados relevantes, bem como dos seus compostos.

<sup>13</sup> O VLE refere-se à concentração total de dioxinas e furanos calculada de acordo com a parte 1 do anexo VI, do decreto-lei 127/2013.

Para além do VLE da legislação geral, cada instalação de incineração está sujeito ao VLE imposta pelas próprias licenças ambientais atribuídas a cada instalação. Na LA da Valorsul, n.º 97/2007, são definidos os seguintes VLE médios diários, tabela 6, para os gases emitidos, em geral mais exigentes do que a legislação em vigor.

**Tabela 6:** VLE constante na Licença Ambiental da CTRSU da Valorsul

Poluentes	Médias diárias (mg/Nm <sup>3</sup> )	Médias semi-horárias intervalo de 30 minutos (mg/Nm <sup>3</sup> )
Monitorização contínua		
Partículas	5	20
HCl	8	50
COT	10	20
HF	1	2
SO <sub>2</sub>	40	150
NOx (NO+NO <sub>2</sub> )	180	350
CO	30	100
NH <sub>3</sub>	10	10
Partículas	5	20

Para os poluentes monitorizados em descontínuo, as dioxinas e furanos, os VLE são os mesmos que constam no Decreto-Lei 127/2013. De notar que os VLE das médias semi-horárias da tabela 6 correspondem a 100% das médias a intervalos de trinta minutos e o VLE do CO é em valor médio a intervalos de 30 minutos.

✓ Monitorização das emissões

Todas as instalações de incineração de resíduos têm de realizar um programa de monitorização interna para avaliar os níveis de emissão dos efluentes gasosos e consequentemente o seu desempenho ambiental. A monitorização interna consiste no controlo dos poluentes, cujos VLE constam da licença ambiental e Decreto-Lei nº 127/2013: Partículas, HCl, HF, SO<sub>2</sub>, NOx, CO, metais pesados, dioxinas e furanos.

Os metais pesados, as dioxinas e furanos são monitorizados pontualmente, ou seja a sua medição é efectuada pelo menos duas vezes por ano, com um intervalo mínimo de dois meses entre medições, pois ainda não existe tecnologia para a sua monitorização em contínuo. Os restantes gases tais como, partículas, COT, CO<sub>2</sub>, HCl, HF; SO<sub>2</sub>, NOx, NH<sub>3</sub> e CO são monitorizados em contínuo.

Os resultados da monitorização efectuada para verificação do cumprimento dos VLE estabelecidos, devem ser corrigidos por aplicação da seguinte fórmula, para as seguintes condições:

Temperatura 273,15 K, pressão 101,3 kPa, 11 % de oxigénio, gás seco no efluente gasoso das instalações de incineração com valorização energética.

$$E_s = \frac{21 - O_s}{21 - O_M} * E_M \quad (25)$$

Em que:

E<sub>s</sub>, concentração calculada de emissões na concentração percentual normal de oxigénio;

- $E_M$ , concentração medida das emissões;
- $O_S$ , concentração de referência de oxigênio;
- $O_M$ , concentração medida de oxigênio.

✓ Condições de tolerância relativamente à ultrapassagem do VLE

As condições de tolerância relativa à ultrapassagem do VLE encontram-se regulamentadas no Decreto-Lei nº 127/2013, artigo 94.º e 95.º, reportando que “as concentrações das substâncias regulamentadas nas descargas para o ar podem exceder os VLE fixados em situações de paragens, perturbações ou avarias tecnicamente inevitáveis nos dispositivos de tratamento ou de medição dos gases. O período máximo admissível das referidas situações é fixado pela APA, I.P na LE ou na decisão final emitida.

*O período máximo ininterrupto durante o qual podem ser excedidos os VLE é de quatro horas, ao fim do qual são imediatamente suspensas as operações de incineração de resíduos em curso nas linhas de incineração da instalação. A acumulação de períodos de funcionamento nessas condições não pode exceder sessenta horas por ano.*

*Em caso de avaria total, o operador reduz ou suspende as operações o mais rapidamente possível e até que as condições normais de funcionamento da instalação possam ser restabelecidas.”*

O presente Decreto-Lei assegura ainda que, “as partículas não devem em caso algum exceder 150 mg/Nm<sup>3</sup> nos valores médios a intervalos de trinta minutos”. O CO e o COT não têm regime de tolerância, ou seja em caso algum pode ser ultrapassado o respectivo VLE para o ar.

A nível do valor limite diário de emissões, os valores dos intervalos de confiança a 95 % de cada resultado medido não devem ultrapassar as seguintes percentagens dos VLE, indicados na tabela 7:

**Tabela 7:** Intervalo de confiança a considerar face a incerteza de medição.

<b>Poluentes</b>	<b>CO</b>	<b>COT</b>	<b>Partículas</b>	<b>HCl</b>	<b>NOx</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	<b>HF</b>	<b>NH<sub>3</sub></b>
<b>IC (%)</b>	10	30	30	40	20	20	40	Não definido

De acordo com o artigo 94.º do referido Decreto-Lei, os valores médios a intervalos de trinta e de dez minutos das concentrações dos poluentes medidos na chaminé através da monitorização contínua, devem ser determinados durante o período de funcionamento efectivo, excluindo as fases de arranque e de paragem em que não sejam incinerados quaisquer resíduos, após a subtracção do valor do intervalo de confiança. São estes valores médios a intervalos de trinta e de dez minutos que se comparam com os estabelecidos na legislação para verificar se é cumprido ou não o VLE semi-horário.

Os valores médios diários devem ser determinados a partir dos valores médios semi-horários e não podem ser excluídos mais de cinco valores médios a intervalos de trinta minutos, num mesmo dia.

No entanto cada instalação possui, para além das condições acima referidas, outras condições específicas de tolerância à ultrapassagem do VLE, constante nas licenças ambientais relativos a cada unidade de incineração.

Na LA da CTRSU, encontram-se presentes no ponto 4.3.2.1, as condições de relativamente à ultrapassagem do VLE, que neste caso são as mesmas condições da legislação em vigor, referidas anteriormente.

- **Emissões atmosféricas**

O Decreto-Lei n.º 78/2004, de 3 de Abril, “estabelece o regime legal relativo da prevenção e controlo das emissões atmosféricas fixando os princípios, objectivos e instrumentos apropriados à garantia de protecção do recurso natural ar, bem como as medidas, procedimentos e obrigações dos operadores das instalações abrangidas, com vista a evitar ou reduzir a níveis aceitáveis a poluição atmosférica originada nessas mesmas instalações”.

De acordo com o referido Decreto-Lei, “a descarga dos poluentes para a atmosfera das instalações de incineração, deve ser feita de uma forma controlada, através de uma chaminé. A altura desta, tem que ser adequada para permitir uma boa dispersão dos poluentes e salvaguardar o ambiente e a saúde humana. É expressamente proibida a diluição dos efluentes gasosos.

A altura de uma chaminé, expressa em metros, é a distância entre o seu topo e o solo, medida na vertical, e é determinada em função do nível de emissões dos poluentes atmosféricos, dos obstáculos próximos, dos parâmetros climatológicos e das condições de descarga dos efluentes gasosos. As chaminés não podem ter uma altura inferior a 10 m, excepto em situações mencionadas nos n.ºs 2 a 6 do artigo 31.º do presente Decreto-Lei.”

## Capítulo 4: Valorsul

### 4.1 Apresentação da Empresa

A Valorsul S. A. é uma empresa cuja missão é “implementar e gerir um sistema integrado, tecnicamente avançado, ambientalmente correcto e economicamente sustentável, para tratamento e valorização dos RSU de 19 municípios das regiões de Lisboa e Oeste de Portugal.” Os municípios em causa são: Alcobaça; Alenquer; Amadora; Arruda dos Vinhos; Azambuja; Bombarral; Cadaval; Caldas da Rainha; Lisboa; Loures; Lourinhã; Nazaré; Óbidos; Odivelas; Peniche; Rio Maior; Sobral de Monte Agraço; Torres Vedras e Vila Franca de Xira; o equivalente a 20% do RSU tratados produzidos em Portugal. A Empresa abrange uma área geográfica de 3.378 km<sup>2</sup> e uma população de 1.6 milhões de habitantes.

O capital da empresa é detido por entidades públicas, maioritariamente pela empresa EGF, com 56.17% do capital. O restante capital está distribuído pelas Câmaras Municipais de Lisboa, Loures, Amadora e Vila Franca de Xira e pela Associação de Fins Específicos – AMO MAIS, que congrega os restantes municípios.

A empresa foi criada em Setembro de 1994 com o objectivo de gerir os RSU de cinco municípios: Lisboa, Vila Franca de Xira, Amadora Loures e Odivelas. Em 2010 integrou a Resioeste passando a ser responsável pela gestão dos RSU dos 19 municípios acima mencionados. Actualmente o sistema de gestão da Valorsul inclui, dois Centros de Triagem; duas Estações de Tratamento e Valorização Orgânica; uma Central de Valorização Energética; uma Instalação de Tratamento e Valorização de Escórias; dois Aterros Sanitários; seis Estações de Transferência e oito Ecocentros (Valorsul, 2014).

#### 4.1.1 Gestão de RSU

Na Valorsul os RSU são tratados e valorizados através de um moderno Sistema de Gestão Integrado adequado às características dos resíduos.

Na Figura 13 observa-se a representação esquemática simplificada do SGR da Valorsul.



Figura 13: Representação esquemática do Sistema de Gestão de RSU da Valorsul (Valorsul, 2014)

Para a recolha de RSU a empresa dispõe de 8 ecocentros, usados para deposição de resíduos de recolha selectiva e de indiferenciados.

A recolha selectiva multimaterial na Região Oeste, ou seja os resíduos recicláveis depositados nos ecopontos nesta região, nomeadamente vidro, papel/cartão, plástico e metal, é realizada pela Valorsul, abrangido 14 municípios: Alcobaça, Alenquer, Arruda dos Vinhos, Azambuja, Bombarral, Cadaval, Caldas da Rainha, Lourinhã, Nazaré, Óbidos, Peniche, Rio Maior, Sobral de Monte Agraço e Torres Vedras. Para o efeito, a empresa tem distribuído cerca de 7094 contentores e mantém uma frota de 14 viaturas de recolha. A recolha selectiva dos resíduos na região de Lisboa Norte é da responsabilidade dos municípios da Amadora, Lisboa, Loures, Odivelas e Vila Franca de Xira. Os materiais recolhidos, são encaminhados para os Centros de Triagem, situados no Lumiar em Lisboa e no Cadaval. Estes centros são unidades industriais que, através de processos mecânicos e manuais, separam materiais que posteriormente são encaminhados para as indústrias de reciclagem.

A recolha de resíduos orgânicos é realizada pelos serviços de Higiene Urbana e Resíduos Sólidos do Município de Lisboa e encaminhados para a Valorsul. A empresa recebe os resíduos recolhidos, nomeadamente os restos de comida provenientes de cantinas, restaurantes e mercados da área metropolitana de Lisboa Norte, e procede com o seu tratamento e valorização. Para tal, a Valorsul dispõe de uma unidade de valorização por digestão anaeróbia, situada no Concelho da Amadora, na região de Serra da Mira, onde estes resíduos são tratados e transformados em correctivo agrícola orgânico, sem aditivos químicos, para utilização na agricultura e jardinagem. Esta transformação é feita através do processo de "digestão anaeróbia" com recuperação do gás da fermentação, (biogás), utilizado na produção de energia eléctrica, vendida posteriormente à rede eléctrica nacional.

Os resíduos de recolha indiferenciada são compactados no local e encaminhados para valorização energética, na CTRSU, em Loures, através de viaturas pesadas. Esta recolha é da responsabilidade dos 19 municípios, excepto quando os resíduos produzidos pelas empresas são superiores a 1.100 litros. Estes são da responsabilidade do próprio produtor.

A empresa possui dois aterros sanitários, o do Mato da Cruz em Vila Franca de Xira e o do Oeste em Cadaval, destinado à deposição final de RSU indiferenciados e de resíduos de outros tratamentos.

O tratamento e valorização das escórias de incineração são realizados na Instalação de Tratamento e Valorização das Escórias, (ITVE)

, em Mato da Cruz. Esta recebe as escórias, da CTRSU, e separa o metal ferroso, o não ferroso e os inertes minerais. Os metais são encaminhados para reciclagem e os inertes podem ser utilizados na construção civil, entre outros (Valorsul, 2014; EGF, 2014).

#### 4.1.2 Recepção e tratamento dos RSU

Os RSU recebidos na Valorsul têm vindo a seguir a mesma tendência da produção nacional, nos últimos anos, conforme os dados da tabela se segue, tabela 8:

**Tabela 8:** Dados<sup>14</sup> de recepção e tratamento dos RSU na Valorsul

Ano	Recepção dos RSU (ton)	Destino dos RSU			
		Aterro (%)	Valorização energética (%)	Valorização orgânica (%)	Reciclagem (%)
2009	715.685	20.0	76.0	3.0	8.99
2010	878.600	30.7	56.5	2.9	9.91
2011	829.948	22.5	62.5	5.4	9.60
2012	758.412	30.0	54.0	6.0	9.00

A recepção dos RSU na Valorsul aumentou no ano 2010 relativamente ao ano 2009, devido à fusão da Valorsul com a Resioeste e decresceu nos últimos anos (2010, 2011 e 2012), como consequência da referida crise económica que o País enfrenta, mudando os hábitos de consumo da população. Em relação aos destinos atribuídos aos RSU, verifica-se uma oscilação entre os 20 e 30% para deposição em aterro. O mesmo acontece com a valorização energética em que o valor varia entre o 50 a 60%. A valorização orgânica tem vindo a aumentar devido, sobretudo, à introdução do TMB que permite aumentar a separação e tratamento dos resíduos orgânicos. A reciclagem multimaterial corresponde cerca de 9% da totalidade dos RSU tratados. Deste modo, conclui-se que mais de metade dos RSU recebidos na Valorsul destina-se à valorização energética.

#### 4.1.3 Composição física dos RSU

Em 2012, os RSU recebidos na Valorsul apresentavam as seguintes composições, indicados na tabela 9:

**Tabela 9:** Composição física dos RSU da CTRSU - Valorsul em 2012 (APA, 2013a)

Materiais	%
Resíduos putrescíveis (orgânicos)	36.1
Papel/cartão	16.1
Plástico	11.1
Vidro	8.7
Metais	1.8
Madeira	0.9
Compósitos	2.9
Têxteis	3.5
Têxteis sanitários	5.5
Finos > 20 mm	9.8
Outros resíduos (resíduos verdes, volumosos, entre outros)	1.3

Como se pode observar, a composição física dos RSU geridos pela empresa é semelhante à composição física nacional, (Figura 7), apresentando maior percentagem dos resíduos putrescíveis/orgânicos, (36.1%).

<sup>14</sup> Dados publicados nos Relatórios Anuais dos Resíduos Urbanos, (RARU), relativamente aos anos 2009, 2010, 2011 e 2012. (APA, 2010; APA 2011; APA 2013a; APA, 2013c).

## 4.2 Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos

A Central tratamento e Valorização Energética, (CTRSU), da empresa Valorsul, (Figura 14), foi inaugurada oficialmente a 14 de Fevereiro de 2000.



**Figura 14:** Central de Tratamento dos RSU da Valorsul (Valorsul, 2014)

A Central fica situada na Freguesia de São João da Talha, Município de Loures e procede à incineração dos RSU provenientes da recolha indiferenciada, com recuperação de calor para produção de electricidade, dos concelhos da área de intervenção da Valorsul.

A Central possui três linhas de incineração, cada uma com capacidade de incinerar 28 toneladas de RSU por hora. A tecnologia empregue é queima em massa (*mass burning*), em fornos de grelha móvel. A Central possui ainda três caldeiras para a produção de vapor, com circulação natural do tipo painel de água com sobreaquecimento, produzindo cada uma, 74.3 t/h (420°C, 52 bar), de vapor. As caldeiras estão ligadas a uma turbina de condensação de 14 andares, que possui uma potência de 50 MW, para a produção de energia eléctrica.

A produção anual de electricidade é de aproximadamente 350 GWh em que parte é para o autoconsumo da Central e parte é injectada na rede eléctrica nacional. Na sua actividade normal, é produzida 0.7% da electricidade nacional, a qual corresponde a cerca de 2% do consumo doméstico do País (Valorsul, 2014).

Na tabela 10, encontram-se os dados da exploração da Central dos últimos cinco anos:

**Tabela 10:** Dados<sup>15</sup> de exploração da CTRSU da Valorsul, nos últimos cinco anos

Exploração	Resíduos incinerados (ton)	Electricidade produzida (MWh)	Electricidade exportada (MWh)	Sucatas ferrosas (ton)	Sucatas não ferrosas (ton)	Escórias inertes (ton)
2009	586.113	343.416	293.837	7.950	1.007	96.299
2010	561.315	345.663	296.325	9.168	884	99.667
2011	577.436	370.63	320.735	8.616	711	95.385
2012	498.275	278.163	239.291	5.856	719	86.540
2013	622.706	364.508	317.348	8.157	979	102.019

<sup>15</sup> Dados publicados nos Relatórios e Contas e Caderno de Sustentabilidade da Valorsul, relativamente aos anos 2009, 2010, 2011, 2012 e 2013. (Valorsul, 2014).

De acordo com os dados apresentados, conclui-se que a Central nos últimos cinco anos, processou cerca de 600 mil toneladas de resíduos por ano e produziu cerca de 350 MWh por ano de electricidade, dos quais cerca de 300 MWh foi exportada. A central recupera ainda sucatas ferrosas e não ferrosas a partir das escórias da valorização energética na ITVE da Valorsul, as quais são enviadas para a reciclagem.

A CTRSU é a Unidade da Valorsul com maiores benefícios em termos de produção de energia e receitas económicas. Como exemplo, em 2013, a venda da energia da CTRSU representou 46% do volume de negócios da Empresa (Valorsul, 2014).

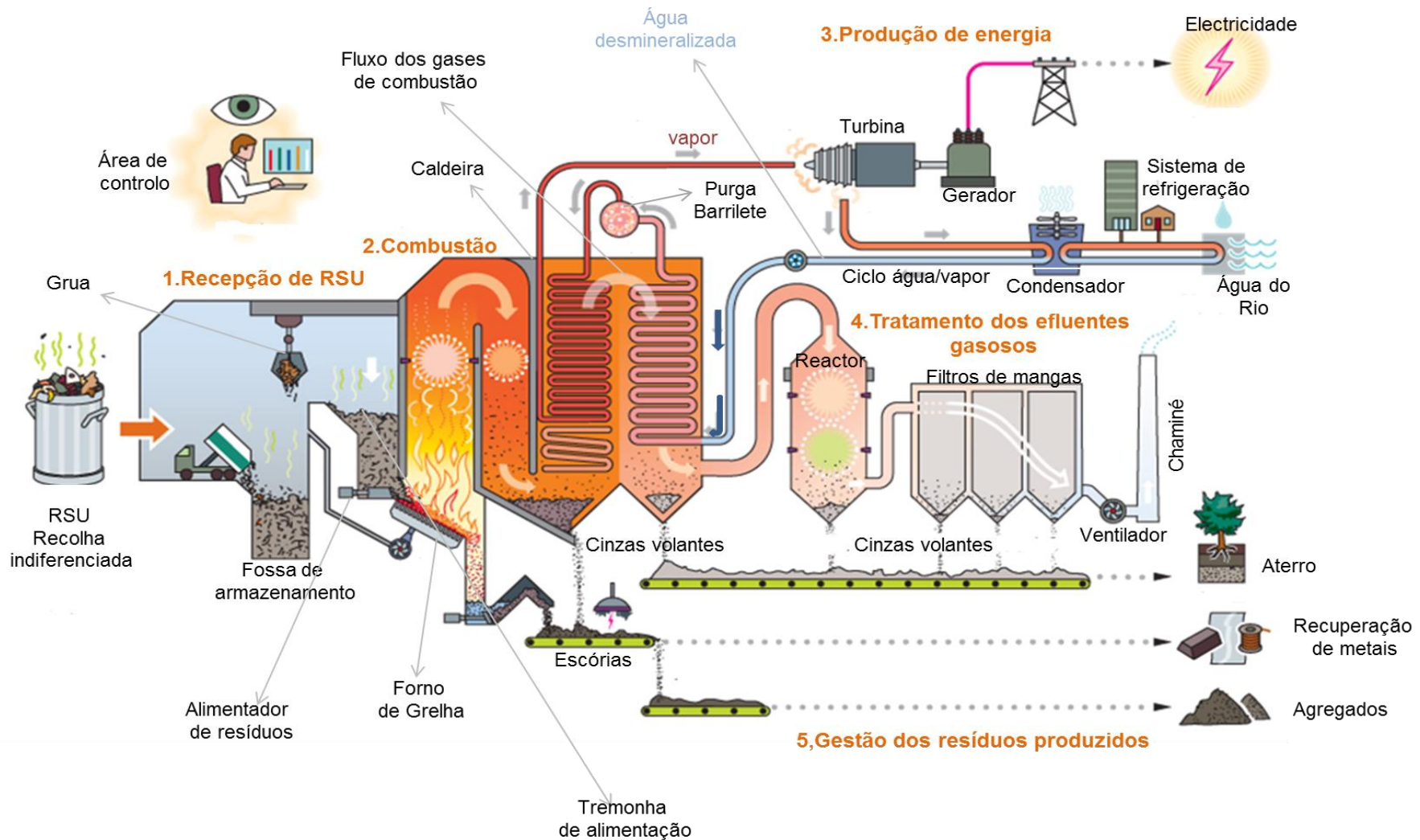
Para o tratamento dos gases de combustão, a CTRSU encontra-se equipada com tecnologias adequadas capazes de reduzir a concentração dos gases produzidos para valores, dentro dos limites previstos pela lei, como será descrita mais adiante neste trabalho.

#### **4.2.1 Funcionamento da CTRSU**

O funcionamento de uma central de valorização energética de RSU resume-me praticamente em cinco operações distintas:

- Recepção de RSU.
- Queima de RSU.
- Produção de energia eléctrica.
- Tratamento dos gases provenientes da combustão dos RSU.
- Gestão dos resíduos produzidos.

A figura que se segue, (Figura 15), representa esquematicamente uma central de valorização energética de RSU, as diversas operações desempenhas e os principais equipamentos utilizados.



**Figura 15:** Representação esquemática do funcionamento de uma central de incineração de RSU com valorização energética (Adaptada de Delta Way Energy, 2014)

#### 4.2.1.1 Recepção dos RSU

De acordo com o Decreto-lei 127/2013, artigo 88.º, “O operador deve tomar todas as precauções necessárias no que respeita à entrega e recepção de resíduos, de forma a prevenir ou a reduzir ao mínimo possível a poluição do ar, solo e águas superficiais e subterrâneas, bem como outros efeitos negativos para o ambiente, como os odores e ruídos e os riscos directos para a saúde humana. Previamente à recepção de resíduos, o operador deve dispor de uma descrição dos mesmos que lhe permita determinar a quantidade de cada categoria de resíduos, classificando cada categoria, sempre que possível, de acordo com a LER”

O edifício de recepção dos RSU na CTRSU da Valorsul, é fechado e mantido em depressão atmosférica para evitar a propagação de odores para exterior. Para o mesmo efeito, também utiliza-se ar do mesmo edifício na combustão dos RSU.

Na CTRSU são admissíveis os RSU recolhidos e transportados pelos municípios nos termos das competências municipais e os RSU e equiparados recolhidos e transportados por terceiros desde que devidamente autorizados pela empresa. Assim, a Central está autorizada, sob a Licença Ambiental n.º 97/2007, a recepcionar os seguintes resíduos, devendo obedecer aos critérios definidos ao nível da hierarquia de gestão de resíduos, privilegiando as acções/operações conducentes, sempre que possível, à sua reutilização, valorização e por último à eliminação:

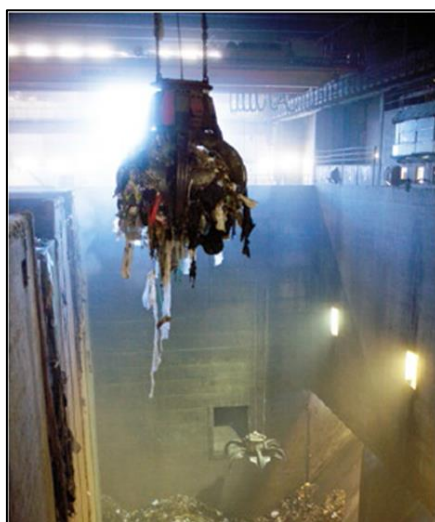
- LER 20 03 (outros resíduos urbanos e equiparados);
- LER 19 05 (resíduos do tratamento aeróbio de resíduos sólidos) e LER 19 06 (resíduos do tratamento anaeróbio de resíduos): resíduos resultantes do processo de tratamento aeróbio de resíduos urbanos biodegradáveis, gerados na Estação de Tratamento de Valorização Orgânica explorada pela Valorsul;
- LER 19 12 (resíduos do tratamento mecânico de resíduos): resíduos resultantes da operação de triagem efectuada na Central de Triagem explorada pela Valorsul;
- Resíduos não perigosos de embalagens de medicamentos e restos de medicamentos originários do sistema integrado de gestão VALORMED, após triagem.

Os veículos de recolha de resíduos ao chegarem à Central são pesados num equipamento constituído por três básculas electrónicas e têm uma capacidade de 60 toneladas. As básculas estão localizadas junto à entrada da instalação, são automáticas e têm capacidade de pesar cinquenta veículos por hora. Os veículos depois de serem pesados, entram no edifício de descarga constituído por 18 rampas de descargas e depositam os resíduos para uma fossa de armazenamento, (Figura 16). A fossa possui uma capacidade de 18035 m<sup>3</sup>, o que permite o armazenamento de 12500 toneladas de resíduos.



**Figura 16:** Camião de recolha de resíduos indiferenciados e fossa de armazenamento de RSU. (Valorsul, 2014)

Existem duas pontes rolantes, equipadas com garras mecânicas, (Figura 17), accionadas hidráulicamente, que servem para a transferência dos resíduos da fossa de armazenamento para os alimentadores das fornalhas (tremonhas). As pontes rolantes são manuseadas por dois operadores, uma por cada ponte, a partir de uma sala de comando (Pássaro et. al., 2002). Cada garra tem uma capacidade de 8 m<sup>3</sup> e serve para alimentar os fornos, homogeneizar e empilhar os resíduos na fossa. Nas garras existem células de pesagem que permitem quantificar os resíduos que alimentam cada fornalha.



**Figura 17:** Garras mecânicas (GEA Niro, 2014)

Os lixiviados, proveniente da fossa de armazenamento de resíduos, são recolhidos numa calceira de drenagem existente no fundo da fossa, e posteriormente pulverizados na fornalha, onde são incinerados juntamente com os resíduos.

#### **4.2.1.2 Combustão dos RSU**

As condições de queima encontram-se regulamentadas no referido Decreto-Lei 127/2013, artigo 86.º, enunciando que “*Uma central incineradora de resíduos sólidos deve ser concebida, equipada, construída e explorada de modo a permitir que, dois segundos após a última injeção de ar de combustão, os gases resultantes do processo atinjam, de forma controlada e*

homogénea, no interior da câmara de combustão, mesmo nas condições mais desfavoráveis, uma temperatura mínima de 850 °C”.

Esta medida rigorosa, foi concebida para a prevenção de formação das dioxinas e furanos no forno, durante a queima dos resíduos, que têm tendências em formarem a temperaturas entre os 200 a 450°C.

A combustão dos RSU na CTRSU é feita em incineradores de grelha, pelo que segue-se a descrição do funcionamento e os vários constituintes deste tipo de incinerador.

Um incinerador de grelha é composto pelas seguintes unidades: alimentador de resíduos; câmara de incineração; grelha de incineração; sistema de injeção de ar; queimadores auxiliares e sistema de descarga das escórias, conforme ilustrada na Figura 18 (BREF, 2006).

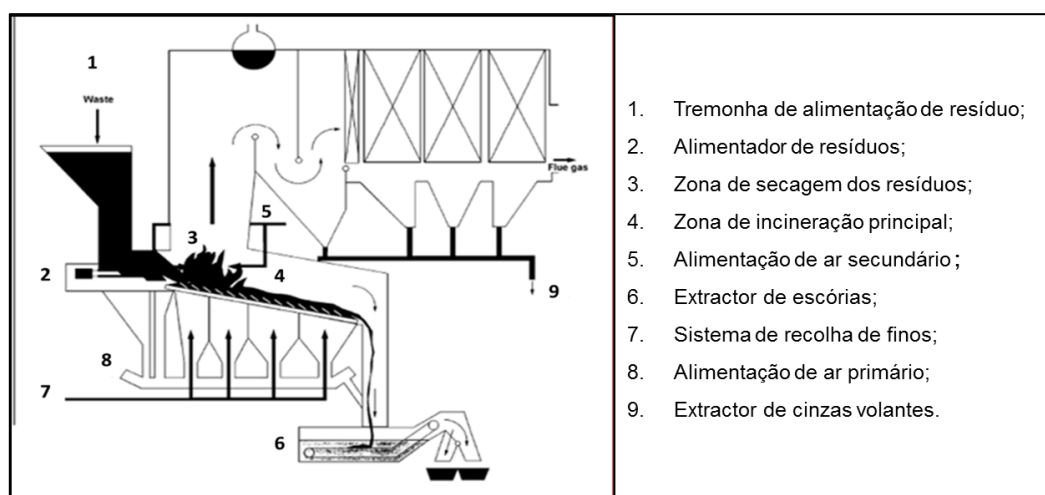


Figura 18: Incinerador de grelha  
(adaptada de BREF, 2006)

- **Alimentador de resíduos:** a alimentação dos resíduos é feita através de tremonhas e alimentadores de resíduos que garantem o fornecimento de resíduos para a câmara de incineração (BREF, 2006).
- **Câmara de incineração:** os resíduos são queimados dentro de uma câmara de combustão ou fornalha, composta por grelhas, sobre as quais os resíduos são despejados, (Figura 19). As grelhas movimentam os resíduos, dentro da câmara, a uma velocidade adequada, tendo estes a oportunidade de secar, (até 150°C), de volatilizar, (até 450°), e finalmente de gaseificar o resíduo carbonáceo ao longo da sua trajectória. Para o efeito recebem ar primário através das grelhas. Os finos e as escórias resultantes da queima, caem através dos orifícios das grelhas e são posteriormente removidos por extractores de escórias.



**Figura 19:** Câmara de Combustão.

- **Grelhas de incineração:** As grelhas encontram-se na parte inferior da câmara de combustão e possuem duas funções: o transporte de resíduos e assegurar uma boa distribuição do ar na fornalha, segundo os requisitos de combustão. As grelhas são classificadas em grelhas estacionárias ou móveis, estas últimas podem ser recíprocas (com movimento descendente ou ascendente das barras), de balanço, vibratórias ou oscilantes. O tempo de residência dos resíduos em cima das grelhas é aproximadamente de 60 minutos (BREF, 2006; Casian, 2013).
- **Sistema de injeção de ar:** O fornecimento do ar para incineração tem como objectivo fornecer o oxidante, misturar os gases de combustão e evitar a formação de escórias na fornalha. É adicionada em vários pontos da câmara de combustão e é descrito como primário e secundário. A injeção do ar primário é feita sob a grelha de combustão enquanto a do ar secundário é feita sobre a grelha. A adição do ar primário e secundário é geralmente feita a partir da área de depósito de resíduos, diminuindo a pressão do ar e o odor (Pássaro *et. al.*, 2002). O ar secundário é injectado dentro da câmara, a alta velocidade por meio de estruturas internas, *nozzles*, cuja secção dos bocais é inferior à da conduta para aumentar a velocidade do ar, ou de outros meios (BREF, 2006). O ar secundário é injectado, normalmente, quando o ar primário é insuficiente para a queima completa dos resíduos, sendo esta situação é, geralmente, bastante frequente numa central de incineração.
- **Queimadores auxiliares:** Os queimadores auxiliares são usados para garantirem a temperatura mínima de 850°C. Segundo a regulamentação de instalações de incineração, Decreto-Lei 127/2013, artigo 86.º, “A câmara de combustão deve ser equipada com, pelo menos, um queimador auxiliar, o qual deve ser activado automaticamente sempre que a temperatura dos gases de combustão, após a última injeção de ar de combustão, desça para valores inferiores a 850 °C. Os queimadores auxiliares devem ser obrigatoriamente utilizados durante as operações de arranque e de paragem, a fim de garantir a manutenção de uma temperatura mínima de 850 °C durante aquelas operações e enquanto a câmara de combustão contiver resíduos não queimados. Não podem utilizar combustíveis susceptíveis de provocar maiores níveis de emissão do que os resultantes da combustão de gasóleo.”

- **Descarga de escórias:** O sistema de descarga de escórias, (extractor de escórias), é usado para o arrefecimento e remoção dos resíduos sólidos que se acumulam sobre as grelhas. Na CTRSU para a extracção dos mesmos, utiliza-se um sistema de pistão de pressão selado com água, com objectivo de selagem e arrefecimento das escórias (BREF, 2006).

A operação de combustão dos RSU na CTRSU decorre nas quatro linhas de incineração, (linha A, B e C), e o poder calorífico nominal dos resíduos de projecto é de 7820 kJ/kg. Na fornalha são atingidas temperaturas na ordem dos 1100°C. Cada fornalha está associada a uma tremonha de alimentação e um alimentador hidráulico constituído por três êmbolos paralelos que empurram os resíduos para a câmara de combustão. Na base desta, existem grelhas móveis recíprocas, (do tipo *Reverse-Acting Stoker*), que são accionadas hidráulicamente de modo a revolverem e a deslocarem os resíduos, promovendo assim, a queima destes (Valorsul, 2013a).

A figura que se segue, Figura 20, representa as grelhas utilizadas na CTRSU:



**Figura 20:** Grelha<sup>16</sup> “Reverse - Acting Stoker” da CTRSU

O caudal de ar é fornecido conforme as necessidades de queima. Na CTRSU o controlo do ar total (ar primário e secundário) é feito em função do caudal de vapor pretendido na caldeira, através de um sistema de controlo em malha fechada. Consoante o caudal de vapor pretendido determina-se o caudal do ar total a ser injectado. Este caudal é corrigido por um factor de correcção estimado pelo operador, em função do poder calorífico dos resíduos. Geralmente resíduos mais pobres, (que possuem baixo poder calorífico), exigem um aumento do caudal de ar e vice-versa.

O caudal do ar secundário é determinado em função da concentração do oxigénio nos gases de combustão à saída do economizador, ou seja, se a concentração do O<sub>2</sub> baixar, aumenta-se o caudal de ar secundário, verificando-se também o contrário, garantindo deste modo a combustão completa, pela presença contínua do oxigénio. É também possível efectuar o controlo do ar secundário em função do caudal de vapor produzido. Se este último aumentar, a temperatura dos gases também aumenta, o que implica um aumento do ar secundário no sistema e vice-versa.

---

<sup>16</sup> Os orifícios observados nas grelhas servem para injeção do ar primário.

O ar primário é determinado pela diferença entre o ar total e o ar secundário no entanto, o controlo é sempre feito em função do caudal do ar total e secundário.

Em condições óptimas de incineração, (quando os RSU são menos húmidos e por isso com PCI elevados), há um incremento da relação entre o ar secundário e o primário (ou total). Nesta situação o caudal do ar primário é menor pois, há uma menor necessidade do mesmo para a secagem dos resíduos. Por outro lado, o valor da concentração do O<sub>2</sub> à saída do economizador é menor, o que implica um aumento do caudal do ar secundário, para manter o excesso de ar da queima constante.

A imagem da Figura 21 ilustra a conduta do ar total ou ar de combustão para a fornalha, da CTRSU:



**Figura 21:** Conduta do ar total (ar de combustão)

### **Influência do excesso de ar na formação dos gases de combustão**

Para combustão dos RSU é necessária uma certa quantidade de ar, ar estequiométrico ou ar teórico, para garantir a queima dos resíduos. Entretanto, para assegurar a combustão completa é necessário um “excesso de ar” de modo a manter um teor suficiente de oxigénio. O excesso de ar é expresso em percentagem e é a razão entre a quantidade do ar utilizado na combustão e a quantidade do ar estequiométrico.

$$\text{Excesso de ar} = \frac{\text{ar utilizado} - \text{ar estequiométrico}}{\text{ar estequiométrico}} \quad (24)$$

A quantidade do ar estequiométrico é determinada com base na composição química média dos resíduos e o ar utilizado é medido. Na CTRSU da Valorsul esta medida é feita pelos caudalímetros.

O excesso de ar influencia tanto a eficiência térmica do processo, como o nível de emissão dos gases de combustão, principalmente as emissões do CO, do SO<sub>2</sub> e do NOx.

Um grande excesso de ar é indesejável pois, diminui a temperatura de combustão e aumenta as perdas de calor, reduzindo a eficiência térmica do processo. Por outro lado, um baixo excesso de ar pode resultar em uma combustão incompleta e na formação do CO, além de possibilitar a acumulação de resíduos não queimados. O valor óptimo do excesso de ar depende da eficiência de combustão aceitável e dos limites de poluição impostos para o NOx, SO<sub>2</sub> e CO.

Como já referido neste trabalho, a temperatura e o teor de O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> durante o processo de combustão, são os principais factores para a formação dos gases NOx. Tendo em conta a principal via de formação dos gases NOx, (NOx - combustível), o teor de oxigénio e de azoto durante o processo de combustão, são as variáveis de maior importância a se considerar. O teor de oxigénio no processo é controlado pelo parâmetro excesso de ar. Quanto maior for o excesso de ar, maior é a concentração do oxigénio no fluxo dos gases e maior será a formação do NOx – combustível. Por outro lado, quanto menor for o excesso de ar, maior será a temperatura de combustão, o que facilita a dissociação das moléculas N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> em átomos de azoto e oxigénio respectivamente, proporcionando as reacções que originam o NOx térmico.

Em relação á formação do CO, se o excesso de ar for insuficiente, a combustão será incompleta devido à insuficiência de oxigénio para a queima total dos resíduos, contribuindo deste modo para o aumento de formação do CO. A emissão de NOx e CO devem ser analisadas simultaneamente, pois a diminuição de um poluente pode levar ao aumento do outro.

Tendo em conta que a formação do gás SO<sub>2</sub> depende do teor de enxofre contido nos resíduos e no teor do oxigénio local, a redução do excesso de ar diminui a quantidade de O<sub>2</sub> disponível para a oxidação do enxofre a SO<sub>2</sub> (Rogaume et. al., 2008).

Neste sentido, visto que o parâmetro excesso de ar influencia de algum modo a formação dos gases referidos anteriormente, é relevante um controlo do mesmo, a fim de diminuir a sua contribuição para formação destes gases. O controlo do excesso de ar, como já foi referido anteriormente, é feito por um sistema de controlo, em malha fechada, controlando a concentração do O<sub>2</sub>, no fluxo dos gases de combustão, medida após o economizador, e também através do controlo da carga da caldeira, ou seja, do caudal de vapor pretendido.

A formação do CO durante a combustão também constitui um bom indicador da qualidade da queima. Se a combustão for completa, o nível de CO tende para zero, o que significa que o ar fornecido é suficiente para garantir-se a queima completa dos resíduos (Pinheiro e Valle, 1995).

#### **4.2.1.3 Produção de energia eléctrica**

A energia térmica libertada na combustão é aproveitada, na caldeira, para produzir vapor sobreaquecido. O vapor é depois utilizado para accionar a turbina do grupo gerador de energia

eléctrica. A água utilizada na caldeira é sujeita previamente a um processo de desmineralização, para evitar incrustações na parede do equipamento.

Na CTRSU, as caldeiras possuem cada uma, dois barriletes ligados a um feixe evaporador e estão equipadas com dois queimadores a gás natural, utilizados nas situações de arranque e de paragem, e ainda para assegurar, a temperatura mínima exigida na câmara de combustão de 850 °C, como já referido.

Para a condensação do vapor que sai da turbina, este é arrefecido num ciclo fechado de refrigeração, água/vapor, (ver Figura 15). O vapor é conduzido para um condensador, onde condensa e a água é alimentada novamente à caldeira, fechando-se assim o ciclo. A água perdida através da purga contínua dos barriletes e das fugas é compensada através de um sistema constituído por bombas que alimentam, de acordo com as necessidades, o tanque de alimentação das caldeiras. A água de reposição é cerca de 6 a 7 m<sup>3</sup>/h.

O arrefecimento do condensador é obtido pela circulação de água em circuito aberto, utilizando a água captada ao Rio Tejo, através de bombas (ver Figura 15). Para impedir-se a entrada de objectos para o circuito aberto de arrefecimento do condensador, são utilizadas grades e filtros.

O sistema de produção de electricidade da CTRSU utiliza um caudal de vapor na turbina na ordem dos 222.9 t/h. A produção de energia eléctrica bruta é de 587 kWh/tonelada de RSU, (ao PCI nominal), dos quais 89 kWh são para o próprio consumo (Valorsul, 2013a).

#### 4.2.1.4 Sistema de tratamento dos efluentes gasosos

O tratamento dos gases gerados no processo de incineração consiste na remoção das partículas, na eliminação de alguns contaminantes como os metais pesados, dioxinas e furanos, redução dos gases NO<sub>x</sub> e na neutralização dos gases HCl, HFe SO<sub>x</sub>. Na CTRSU, cada linha de incineração dispõe de um sistema autónomo de tratamento de gases.

Na tabela que se segue, tabela 11, encontram-se as tecnologias e dispositivos utilizados no tratamento de efluentes gasosos da CTRSU:

**Tabela 11:** Tecnologias utilizadas no tratamento dos gases da CTRSU

<b>Efluentes gasosos</b>	<b>Tecnologias</b>
Partículas	Filtros de mangas
Gases ácidos (SO <sub>2</sub> , HCl, HF)	Sistema semi-húmido Absorção com leite de cal.
NO <sub>x</sub>	Redução não-catalítica selectiva
Metais pesados	Sistemas de adsorção com carvão activado
Compostos orgânicos (Dioxinas e furanos)	Sistemas de adsorção com carvão activado

O sistema de redução dos óxidos de azoto baseia-se no processo de redução não catalítica selectiva por meio da injeção de uma solução aquosa de amónia a 24%, na câmara de combustão. O sistema compreende de um reservatório para armazenamento de amónia e de equipamentos necessários para a vaporização, distribuição e injeção da amónia. O reservatório de armazenagem, em aço-carbono, encontra-se localizado numa bacia de

retenção, numa zona afastada do corpo da Central e tem uma capacidade de armazenar 105 toneladas de amónia. O reservatório dispõe ainda de estação de abastecimento, estação de bombagem e de dispositivos de segurança específicos.

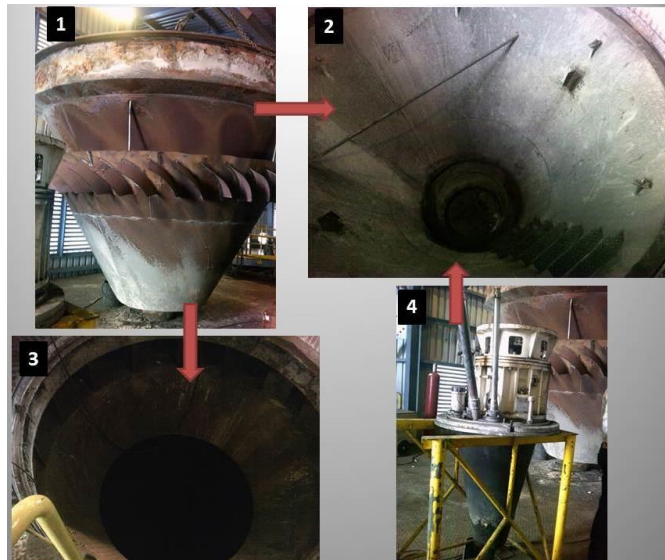
O consumo da amónia de projecto é de 785 g/t de resíduos incinerados. A amónia vaporizada em aquecedores eléctricos é injectada na caldeira, com o auxílio de ar comprimido. A injeção é feita a três níveis distintos da caldeira, contendo cada nível 19 *nozzles* de injeção, instaladas nas paredes da caldeira, o que permite a optimização da gama de temperatura adequada à reacção de redução dos gases NOx, em função da variação da carga térmica da fornalha. A regulação do caudal de amónia a injectar em cada um dos níveis é em função do teor de NOx dos gases de combustão, medido no sistema de monitorização em contínuo.

O processo adoptado pela empresa para a neutralização dos gases HCl, HF e SO<sub>2</sub> é o processo semi-húmido, com recurso à utilização de uma suspensão aquosa de leite de cal. A cal utilizada na preparação da solução encontra-se armazenada em dois silos, que possuem cada um, uma capacidade de armazenar 175 toneladas de cal e dispõem ainda de filtros de retenção de poeiras e de válvulas de segurança. A neutralização ocorre num reactor, sendo o tempo de residência dos gases no equipamento é na ordem de 12 segundos. A utilização de leite de cal permite não só a redução das emissões dos gases SO<sub>2</sub> mas também impede automaticamente a formação de ácidos a partir deste poluente tal como o ácido sulfídrico.

Os reactores de neutralização são em aço-carbono e funcionam em co-corrente com fluxo descendente dos gases de combustão e dispõem de dispositivos de atomização do leite de cal e de promotores do efeito de turbilhamento dos gases. A turbulência dos gases de combustão e a pulverização da suspensão de leite de cal promovem um estreito contacto gás-sólido, aumentando a eficiência do processo.

O leite de cal preparado tem uma densidade de 1.124g/cm<sup>3</sup> e encontra-se armazenado em tanques de preparação da referida solução. Este é posteriormente enviado através de bombas, para o atomizador localizado no topo do reactor, onde posteriormente é diluído com água e atomizado em finas gotas para o fluxo dos gases, no reactor. Existem duas bombas de alimentação de leite de cal, sendo uma reserva da outra. Para minimizar a deposição de cal nas tubagens, o leite de cal é mantido em recirculação, com retorno aos tanques de armazenagem. A regulação do caudal de leite de cal a injectar é efectuada por adequadas cadeias de controlo e a regulação da temperatura de saída dos gases do reactor é obtida por meio da injeção de água à entrada dos reactores. O consumo de cal de projecto é de 8 kg/t de resíduos incinerados (Valorsul, 2014; CITIDEP, 2014).

A Figura 22 ilustra a imagem de um reactor (depurador), utilizado na neutralização dos gases HCl, HF e SO<sub>2</sub>, na CTRSU:



**Figura 22:** Reactor de neutralização dos gases ácidos da CTRSU.

A imagem 1 ilustra o exterior do reactor, ou seja, lado de passagem dos gases, a imagem 2 corresponde ao interior do reactor, local onde está instalado o atomizador, a imagem 3 é o sítio por onde passam os gases e onde se encontra instalado o reactor de neutralização e a imagem 4 é o atomizador.

A eficiência de remoção dos gases HCl e SO<sub>2</sub> depende da temperatura, da humidade e do tempo de residência no interior do reactor. Quanto menor for a temperatura no reactor, maior é a eficiência de remoção dos gases e quanto maior for a humidade maior é a eficiência de remoção, uma vez que a água diminui a temperatura no interior do reactor. Por isso, a temperatura dos gases é controlada através da injeção de água no atomizador. Na CTRSU a temperatura de saída dos gases no reactor é mantida nos 150 °C, tendo em conta que abaixo deste valor poderá ocorrer a condensação dos gases ácidos o que provocaria corrosão nos equipamentos. A adição de água no sistema, não só contribui para um aumento de eficiência de remoção dos gases ácidos como também, diminui o consumo de leite de cal, uma vez que, normalmente é utilizado um excesso desse reagente para se conseguir eficiências de remoção elevadas. Contudo, na prática, este nunca é de 100%, por mais excesso de leite de cal que se utilize (Ting et. al., 2007).

O sistema de remoção de dioxinas, furanos e metais pesados consiste na injeção de carvão activado antes do atomizador, à entrada do reactor de neutralização dos gases ácidos. Este sistema é constituído por um silo de armazenamento do carvão activado e por equipamentos e dispositivos necessários para a extracção e alimentação do carvão activado ao reactor. O silo, em aço-carbono, tem uma capacidade de armazenar 36 toneladas de carvão activado e o consumo de projecto do mesmo é de 460 g/t de resíduos incinerados.

O carvão activado apresenta uma elevada eficiência de remoção das dioxinas, furanos e metais pesados, cerca de 99%, e é filtrado posteriormente a partir do fluxo de gases de combustão utilizando filtros de mangas e farão parte integrante dos resíduos sólidos resultantes do tratamento de gases.

Na tabela a seguir apresentada, tabela 12, encontram-se os dados do consumo dos reagentes utilizados no tratamento dos gases, carvão activado, amónia e leite de cal, da CTRSU nos últimos quatro anos:

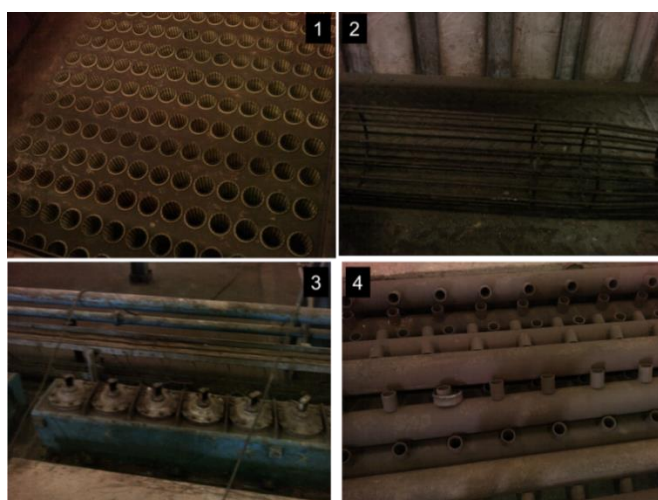
**Tabela 12:** Consumo do leite de cal, amónia e carvão activado no tratamento dos gases de combustão da CTRSU

Ano	Leite Cal (ton)	Amónia (ton)	Carvão activado (ton)
2010	3499	918	259
2011	3769	957	222
2012	2944	877	176
2013	3823	1099	243

De acordo com os dados apresentados, verifica-se que nos últimos quatro anos o consumo de leite de cal foi em média superior a 3500 toneladas, o da amónia foi em média acima dos 960 toneladas e o do carvão activado foi em média 225 toneladas. O maior consumo é o do leite de cal, utilizado no tratamento dos gases HCl, SO<sub>2</sub> e HF. O consumo dos reagentes depende da qualidade e quantidade dos resíduos a incinerar, da quantidade dos gases que se formam durante a combustão e também da eficiência do sistema de controlo de emissão dos gases, discutido mais à frente neste trabalho.

O processo de remoção das partículas contidas nos gases de combustão é feito por intermédio dos filtros de mangas. Os filtros são constituídos por oito compartimentos, em paralelo, em que cada um tem 196 mangas em poliamida com superfície revestida a *teflon*. Os gases de combustão atravessam as mangas de filtração no sentido do exterior para o interior, ficando as partículas, em suspensão, retidas no lado de fora das mangas. Estes filtros dispõem de dispositivos automáticos de limpeza das mangas, por meio de ar comprimido, que passa do interior para o exterior, controlados por medição de pressão diferencial a qual funciona como indicador do nível de colmatção das mangas (Valorsul, 2014; CITIDEP, 2014).

A figura que se segue, Figura 23, ilustra os constituintes de filtros de mangas da CTRSU.



**Figura 23:** Constituintes do sistema de Filtros de mangas.

A imagem 1 corresponde ao compartimento dos filtros de mangas, a 2 corresponde à armação onde é colocado cada filtro e a imagem 3 e 4 correspondem ao sistema de injeção de ar para descolmatação dos filtros de mangas.

Geralmente a eficácia dos sistemas de tratamento dos gases, numa central de incineração de RSU, situa-se entre 77% a 99.9%. Considerando como exemplo, uma central de incineração de RSU em Portugal, a Lipor, encontra-se presente na tabela 13 o resultado de um estudo realizado, (Cardoso, 2010), sobre a análise de eficiência do sistema de tratamento de gases da referida central.

**Tabela 13:** Eficiência do sistema de tratamento de gases da Central de incineração de RSU da Lipor (Cardoso, 2010)

Poluentes	Eficiência (%)
Partículas	99.9
SO <sub>2</sub>	77.6
HF	88.9
HCl	99.1
Hg	90.0
Cd+Tl	98.3
Pb+Cu+Mn+Cr+As+Sb+Co+V+Sn+Ni+Tl	99.9
Dioxinas e furanos	99.2

Verifica-se que o sistema de remoção das partículas dioxinas e furanos e metais pesados possuem uma eficácia acima dos 99%. O sistema de tratamento dos gases SO<sub>2</sub> e HF é o que apresenta eficácia mais baixa, no entanto superior aos 77%.

Para o cálculo da eficácia do sistema de tratamento de gases é necessário ter-se conhecimento das concentrações de cada poluente antes e depois do sistema de tratamento (Cardoso, 2010). No caso da CTRSU da Valorsul este cálculo não é possível tendo em conta que não existem meios de determinar as concentrações de gases antes da entrada do sistema de tratamento.

#### 4.2.1.5 Gestão dos resíduos produzidos

Os resíduos sólidos produzidos por uma central de incineração de RSU incluem escórias, finos, cinzas provenientes da caldeira e cinzas volantes e resíduos provenientes do sistema de tratamento dos gases. Contudo as escórias representam cerca de 80% do total dos resíduos sólidos produzidos. As escórias consistem no material queimado descarregado pela base da fornalha e geralmente estão misturados com os finos que passam directamente através das grelhas e são removidos em conjunto no extractor de escórias. Numa instalação de incineração de queima em massa, as escórias contêm quantidades consideráveis de metais e vidro bem como, compostos orgânicos não queimados ou incompletamente incinerados. A quantidade de material orgânico e não orgânico presente nas escórias constitui uma medida de eficácia da instalação (Dias, 1997).

De acordo com o Decreto-Lei nº 127/2013, artigo 90.º, *“todas as instalações de incineração de resíduos devem processar-se de modo a atingir um nível de incineração que permita que o teor de carbonos orgânicos totais das escórias e das cinzas de fundo seja inferior a 3 % ou que a sua perda por combustão seja inferior a 5 % do peso, sobre matéria seca, do material.”*

A gestão dos resíduos sólidos produzidos numa instalação de incineração passa sobretudo pelo tratamento das escórias, das cinzas/cinzas volantes e dos produtos produzidos durante o tratamento dos gases.

Das escórias são recuperados os metais ferrosos e não ferrosos, por separação magnética e crivagem que são enviados para reciclagem. As escórias, depois deste processo, são enviadas para aterros sanitários ou então utilizadas como agregados para a construção civil, como por exemplo em sub-base de auto-estradas.

Na CTRSU são produzidos cerca de 316 kg de escórias por tonelada de RSU incinerados. As escórias são enviadas para a ITVE em

Mato da Cruz e após maturação adequada, podem ser utilizadas como inerte para a construção civil, obras públicas e eventual recuperação paisagística de pedreiras e minas, entre outros.



**Figura 24:** Valorização das escórias pela CTRSU.

A Figura 24 ilustra as escórias produzidas durante a combustão de RSU e as escórias após tratamento adequado, também designados de inertes, utilizados na construção civil, respectivamente (Valorsul, 2014).

As cinzas podem ser provenientes do sistema de recuperação do calor (principalmente da caldeira) ou do sistema de tratamento dos gases, (cinzas volantes). Consistem em material particulado e podem ser combinadas com as escórias ou resíduos, dependendo do projecto de uma instalação.

Os resíduos provenientes do sistema de tratamento de gases são constituídos por materiais recolhidos nos dispositivos de controlo de poluição e incluem as cinzas volantes, os reagentes utilizados no tratamento dos gases, (como por exemplo, a cal, o carvão activado e a amónia), e condensados dos gases de combustão.

As cinzas volantes são materiais particulados, resultantes da queima de resíduos, arrastados juntamente com os gases de combustão e incluem compostos voláteis condensados do arrefecimento dos gases. Estas cinzas são removidas antes do sistema de tratamento dos gases, em diversos pontos da caldeira e requerem uma gestão em particular, tendo em conta que possuem um potencial de poluição elevada, devido à presença de metais pesados e por serem compostos por partículas de dimensões muito reduzidas (na ordem dos micrómetros). O actual sistema de remoção de partículas atinge normalmente uma eficiência de cerca de 90%, o que resulta numa elevada quantidade de cinzas volantes removidas. O manuseamento das cinzas volantes deve ser de tal forma a evitar a sua fuga para o exterior. A sua remoção deve

ser feita por sistemas de captação com condutores pneumáticos e devem ser transportadas em contentores apropriados até ao local de destino (Dias,1997).

Na CTRSU da Valorsul, o total das cinzas resultantes (cinzas volantes e cinzas provenientes do tratamento dos gases) é cerca de 30 kg/t de RSU incinerados. As cinzas são inertizadas, através da mistura com cimento e reagentes específicos e enviados para uma célula própria do aterro sanitário de Mato da Cruz (Valorsul, 2013a).

#### **4.2.2 Monitorização das emissões atmosféricas**

O programa de monitorização da CTRSU engloba a monitorização da qualidade de ar; monitorização das emissões atmosféricas, do ruído ambiente; da qualidade das águas e sedimentos; do ecossistema terrestre e estuarino; da vigilância da saúde pública e do factor social. No entanto, neste trabalho será analisado apenas a monitorização das emissões atmosféricas, ponto de interesse deste trabalho.

A monitorização das emissões atmosféricas tem por objectivo o autocontrolo das emissões das três linhas de incineração da CTRSU, (A, B e C), também denominadas por FF1, FF2 e FF3, respectivamente, e é efectuada de acordo com o ponto 4.3.2.1 da LA da CTRSU e regulamentação em vigor, Decreto-Lei n.º 127/2013.

A monitorização das emissões atmosféricas é realizada em modo contínuo pela própria CTRSU e medida no mesmo local. Em modo descontínuo a monitorização é realizada por laboratórios certificados, contratados pela empresa.

##### **4.2.2.1 Monitorização contínua**

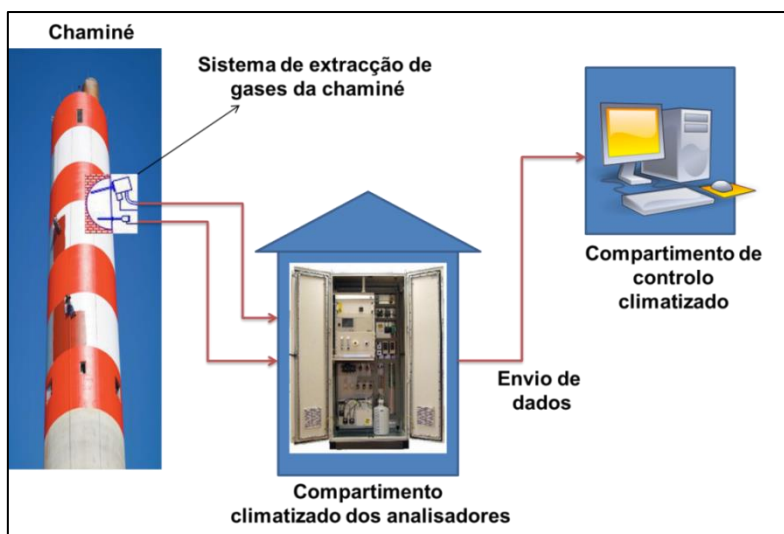
A monitorização contínua, com já foi referido, engloba a determinação das concentrações de partículas, COT, CO<sub>2</sub>, HCl, HF; SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> e do CO (Valorsul, 2014). Na CTRSU existe uma chaminé com três condutas de saída de gases independentes, uma para cada linha de incineração, A, B e C. Em cada conduta é efectuada a recolha de gases que são enviados posteriormente para os analisadores. Neste sentido, a monitorização é feita sempre relativamente às três linhas de incineração existentes.

A Figura 25 ilustra as condutas de saída dos gases dos três sistemas de tratamento, uma por cada linha de incineração, e respectiva entrada na chaminé.



**Figura 25:** Sistema de tratamento dos efluentes gasosos correspondentes às três linhas de incineração da CTRSU (Valorsul, 2014)

A figura que se segue, Figura 26, ilustra a representação esquemática do sistema de monitorização em contínuo os efluentes gasosos de uma central de incineração de RSU:



**Figura 26:** Sistema de monitorização contínua dos efluentes gasosos (adaptada de analytics ltd., 2014)

A amostra dos gases é extraída na chaminé por um sistema de extracção e encaminhada para um sistema de analisadores, que determina posteriormente a concentração de cada gás presente na amostra.

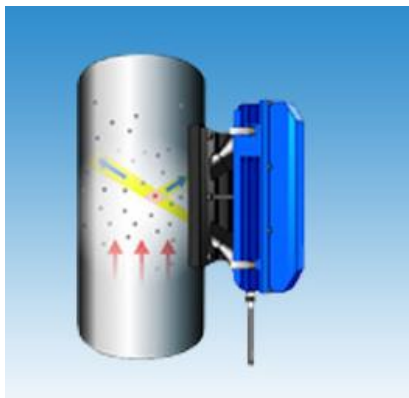
Várias tecnologias são utilizadas na monitorização contínua das emissões, sendo a mais utilizada a tecnologia de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier, (FTIR). Muitas empresas produzem analisadores deste tipo, tomando como um exemplo, o da marca ABB Analítica, modelo ACF-NT, (sistema multicomponente), que mede em contínuo de forma quantitativa e selectiva os poluentes referidos anteriormente, (excepto partículas). A Figura 27 ilustra o respectivo analisador, o mesmo modelo do analisador instalado na CTRSU.



**Figura 27:** Analisador FTIR da marca ABB, ACF-NT para monitorização contínua dos gases. (ABB, 2014)

As medidas são efectuadas numa base quente e húmida para evitar quaisquer perdas. O analisador FTIR oferece um elevado nível de estabilidade, robustez, precisão e selectividade (ABB, 2014).

Para a monitoração do teor das partículas, temos como exemplo, o analisador óptico do GRUPO DURAG, modelo DR-300-40, que baseia nos fenómenos da reflexão da luz incidente.



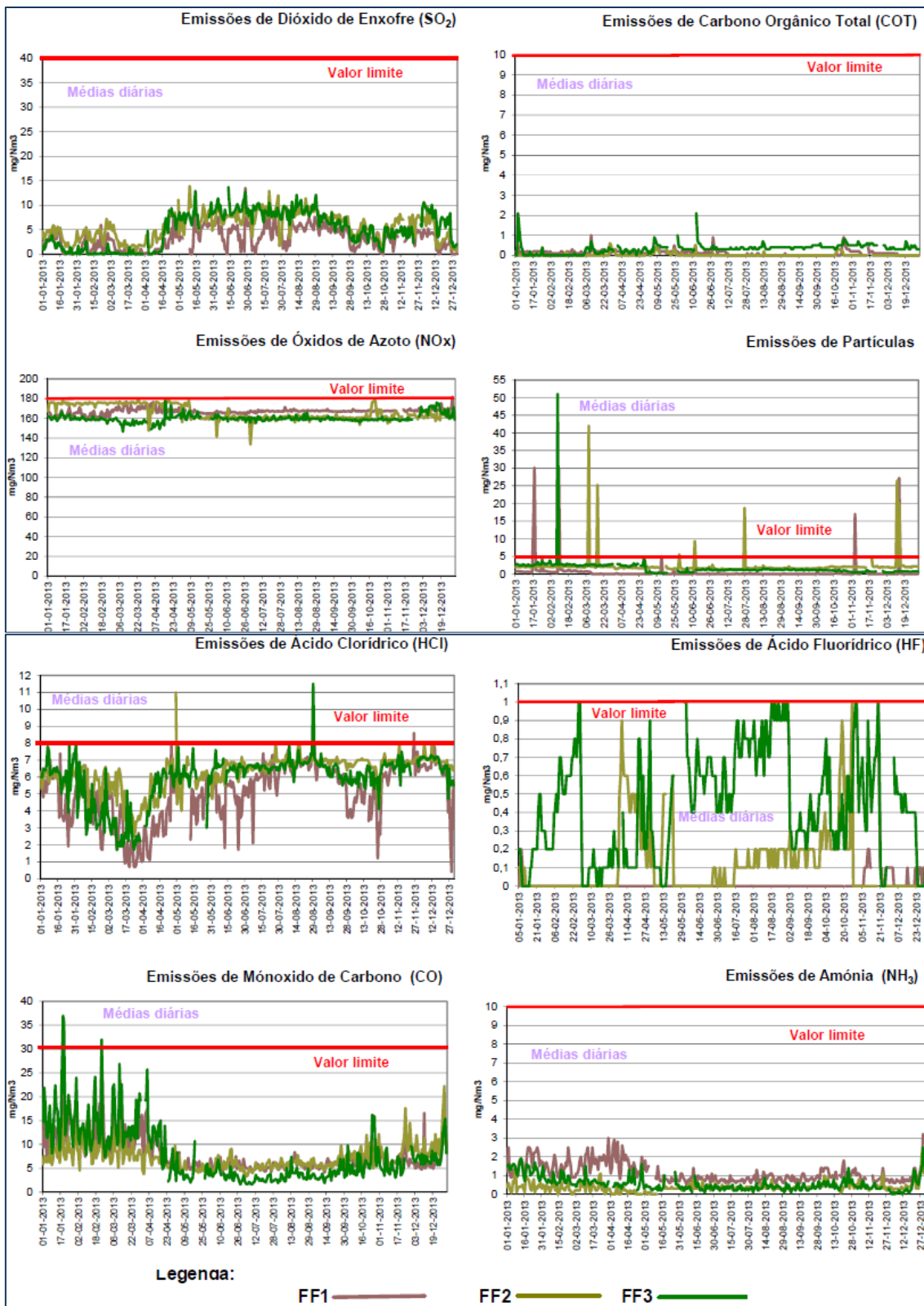
**Figura 28:** Analisador das partículas, modelo DR-300-40 do Grupo Durag. (FLSmith, 2014)

O respectivo analisador é especialmente aplicável para medições de baixas concentrações de partículas, directamente no fluxo dos gases, com elevado limite de detecção (FLSmith, 2014).

De acordo com o ponto 5.5.1 da LE da CTRSU, “os equipamentos de monitorização em contínuo deverão ser submetidos a uma operação de calibração dinâmica, mediante medições paralelas e utilizando métodos de referência, pelo menos de três em três anos, sem prejuízo das operações de calibração a que os mesmos devem ser submetidos de acordo com a periodicidade e outros requisitos constantes nos respectivos manuais de exploração”. As operações de calibração são efectuadas de acordo com a norma EN 14181:2003 (*Stationary Source Emissions - Quality Assurance of Automated Measuring Systems*)”.

Encontra-se associado aos analisadores, um sistema de armazenamento e tratamento de dados, onde se verifica continuamente as emissões de cada poluente e os alertas em caso de ultrapassagem do VLE. Os analisadores e o sistema de recepção de dados encontram-se num ambiente climatizado.

Como exemplo de uma monitorização contínua dos poluentes da CTRSU, temos a monitorização referente ao 4º trimestre do ano 2013, relativa às emissões médias diárias dos gases das 3 linhas de incineração, cujos valores de emissões encontram-se representados no gráfico da Figura 29:



**Figura 29:** Monitorização contínua dos poluentes da CTRSU da Valorsul relativamente ao 4º trimestre de 2013 (Valorsul, 2014)

Da análise da Figura 29, verificou-se que no 4º trimestre de 2013, os gases com situações de emissões médias diárias mais críticas foram: as partículas, em que verificou-se ultrapassagem esporádicos do VLE nas 3 linhas de incineração; o HCl em que houve ultrapassagem das

médias diárias nas linhas de incineração, (A, B e C), assim como o CO na linha C. Verifica-se também que as médias diárias do NOx e HF foram muito próximos do VLE regulamentado no entanto, não houve situações de ultrapassagens. As médias diárias do SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> e COT foram baixas, com valores bastante inferiores ao VLE regulamentado.

As ultrapassagens ao VLE, em geral, foram devidas ao entupimento da linha de leite de cal e da qualidade dos RSU recebidos no referido ano (Valorsul, 2014).

#### **4.2.2.2 Monitorização descontínua**

A monitorização descontínua é feita para os poluentes, metais pesados, dioxinas e furanos. Na CTRSU o processo de monitorização dos metais pesados baseia-se na norma EN14385:2004, no caso do mercúrio na EN13211:2001 e por sua vez, no caso das dioxinas e furanos, o processo de monitorização baseia-se na norma EN1948-1:2006 (Valorsul, 2013b).

Para a descrição dos procedimentos desta monitorização baseou-se num relatório<sup>17</sup> de 1ª amostragem de 2013, elaborada pela Direcção de Estudos, Qualidade e Inovação e pela Direcção de Valorização Energética da Valorsul.

“Para a determinação das concentrações de dioxinas e furanos, é extraída uma fracção de gás da chaminé através de uma sonda de vidro arrefecida com água, para arrefecer a amostra abaixo dos 20°C. As dioxinas e furanos adsorvidas em partículas e na fase gasosa são recolhidas no trem da amostragem que é constituído por um frasco de condensados e uma unidade com duas espumas de poliuretano e um filtro plano com alta eficiência de recolha para separar as partículas pequenas e dividir os aerossóis.

À amostra recolhida é feita a extracção e purificação das dioxinas e furanos, usando a técnica de cromatografia em colunas múltiplas com vários adsorventes. A identificação, separação e quantificação dos referidos poluentes é feita utilizando um cromatógrafo gasoso ou espectrometria de massa de alta resolução combinada com diluição isotópica de amostras, em diferentes etapas.

Para determinação da concentração dos metais pesados, estes são recolhidos, na fase particulada, por uma sonda e um filtro. Para recolher os metais na fase gasosa, estes são borbulhadas numa solução de peróxido de hidrogénio e numa solução acidificada de permanganato de potássio (apenas para Hg). Após a digestão as amostras são analisadas num laboratório externo por espectrofotometria de indução de plasma e absorção atómica” (Valorsul, 2013b).

Na tabela 14, apresentam-se os valores da monitorização descontínua da CTRSU, relativos à 1ª amostragem do ano 2013.

---

<sup>17</sup> Valorsul, (2013b). *Monitorização em descontínuo das emissões atmosféricas da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos – Metais Pesados, Dioxinas e Furanos – relatório-1ª Amostragem 2013*. Direcção de Estudos, Qualidade e Inovação; Direcção de Valorização Energética. Valorsul. Lisboa.

**Tabela 14:** Monitorização descontínua da CTRSU no ano 2013  
(Valorsul, 2013b)

<b>Poluentes</b>	<b>Emissão linha A (FF1) (mg/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>Emissão linha B (FF2) (mg/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>Emissão linha C (FF3) (mg/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>Valor limite (mg/Nm<sup>3</sup>)</b>
Cd + Ti	0.0041	0.0040	0.0042	0.0500
Hg	0.0002	0.0015	0.0002	0.0500
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V	0.0269	0.0121	0.0103	0.5000
Dioxinas e Furanos	0.00541	0.0144	0.00511	0.1000

De acordo com os dados da tabela anterior, verifica-se que as concentrações obtidas dos referidos poluentes pela monitorização descontínua são inferiores ao VLE regulamentado. Geralmente as emissões dos metais pesados, das dioxinas e furanos, na CTRSU, estão sempre em conformidade com a regulamentação em vigor.

#### **4.2.3 Sistema de controlo de emissão dos gases ácidos**

Neste subcapítulo pretende-se efectuar uma análise sobre o sistema de controlo de tratamento dos gases ácidos da CTRSU da Valorsul, com o objectivo de o caracterizar e analisar as principais dificuldades relacionadas com o mesmo. Para este estudo foram efectuadas algumas visitas à Central, onde se ficou a conhecer o sistema de controlo da unidade de uma forma genérica, e realizou-se a simulação de alguns parâmetros considerados relevantes para o trabalho. Por fim apresentam-se possíveis soluções teóricas, para as dificuldades encontradas.

Na CTRSU existem dois sistemas de controlo de tratamento dos gases ácidos. Um para o tratamento de gases NO<sub>x</sub> e outro para o tratamento de gases SO<sub>2</sub>, HCl e HF.

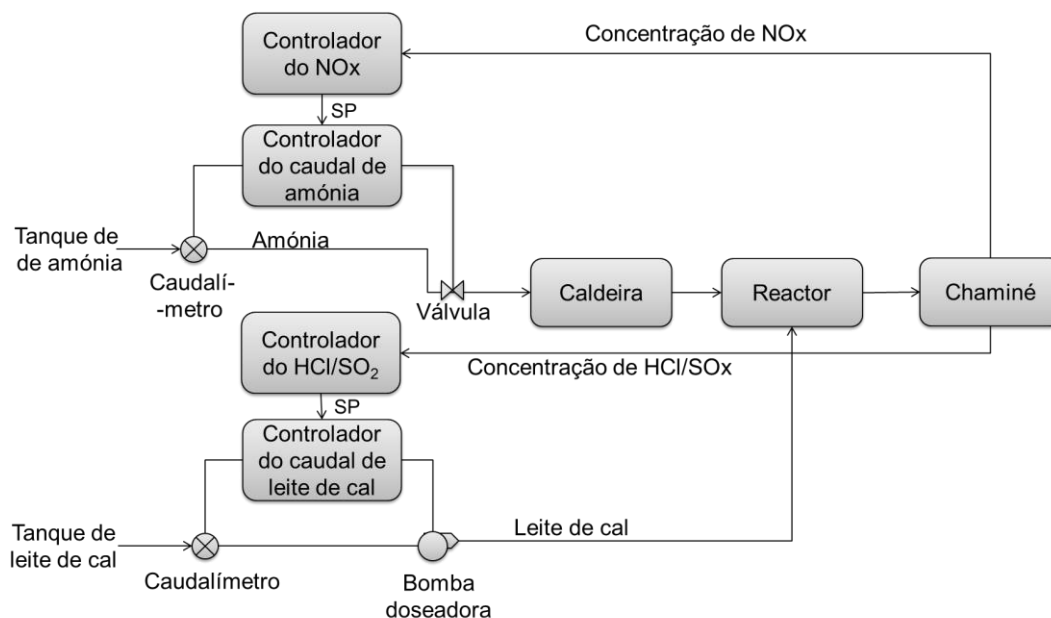
O controlo de emissão do HCl, SO<sub>2</sub> e HF é feito em simultâneo, ou seja utiliza-se o mesmo sistema de controlo. No entanto o controlo de emissão destes gases é baseado apenas nas emissões do HCl e SO<sub>2</sub>, uma vez que este controlo permite, em princípio, a neutralização dos gases HF sem haver a necessidade de um controlo baseado nas emissões deste gás.

Neste trabalho é analisado apenas os sistemas de controlo dos gases NO<sub>x</sub> e HCl, tendo em conta que o controlo de emissão do SO<sub>2</sub> é idêntica á do HCl.

Em ambos os sistemas, o controlo é feito em cascata (duas variáveis a controlar e uma variável manipulada), no qual se pretende controlar a emissão dos gases ácidos e a quantidade óptima dos reagentes necessário para a neutralização destes, conforme ilustrado na Figura 30. Neste sentido, as variáveis de controlo ou de processo são os caudais dos reagentes, (leite de cal e amónia), e as concentrações dos gases, (NO<sub>x</sub>, HCl e SO<sub>2</sub>), e as variáveis manipuladas são os caudais de leite de cal e da amónia. No caso dos gases NO<sub>x</sub>, pretende-se controlar a sua emissão e regular a quantidade da amónia necessária para o seu tratamento, enquanto para o caso dos gases HCl e SO<sub>2</sub> pretende-se controlar as suas emissões e a quantidade do leite de cal necessária para a neutralização dos mesmos.

O controlo em cascata permite a regulação das quantidades óptimas das soluções da amónia e de leite de cal, minimizando eventuais perturbações nos sistemas de alimentação de amónia e de leite de cal.

A figura que se segue, Figura 30, ilustra uma representação esquemática simplificada do sistema de controlo dos gases ácidos e dos reagentes leite de cal e amónia, utilizado na CTRSU da Valorsul.



**Figura 30:** Sistema de controlo simplificada dos gases ácidos da CTRSU.

Este sistema de controlo permite que a concentração dos gases ácidos emitida esteja em conformidade com o VLE estabelecido pela lei e pela LA da Central.

Os gases são extraídos na chaminé e enviados para o sistema de monitorização em contínuo, onde se determina a concentração de cada gás, como descrito no subcapítulo anterior. Esta concentração é enviada para o sistema de controlo dos gases, que determina as quantidades dos reagentes, (amónia para o caso do NO<sub>x</sub> e leite de cal para o caso do HCl e SO<sub>2</sub>), necessárias para o tratamento destes gases.

As saídas dos controladores dos gases NO<sub>x</sub> e HCl/SO<sub>2</sub> representam o *Set Point*, (SP), ou valor de referência dos controladores dos caudais de amónia e leite de cal, respectivamente. Estes procedem com o controlo da quantidade das referidas soluções e enviam sinais para a válvula de regulação da amónia e para a bomba doseadora de leite de cal, que regulam as quantidades destes reagentes a serem injectados para o sistema de tratamento dos gases. A descrição do sistema de controlo do NO<sub>x</sub> e HCl será feita em detalhes mais à frente neste capítulo.

O controlo de emissão dos gases ácidos é feito em malha fechada e a sintonização dos controladores é feita pelo método de tentativa e erro. O controlador utilizado no controlo dos gases é do tipo PI (Proporcional Integral) e o dos caudais é do tipo PID (Proporcional Integral Derivativo).

O controlador PID apesar de ser um controlador simples e fácil de aplicar, apresenta algumas desvantagens, nomeadamente se houver atraso na resposta do sistema a controlar, contribuindo para sistemas com sobrelevação, (*overshoot*<sup>18</sup>), dificultando o ajuste dos parâmetros e sintonia do mesmo.

O atraso pode ser definido como o tempo que decorre entre uma variação no actuador, (por exemplo, abertura de uma válvula), e o tempo de início da alteração da grandeza a controlar devido à variação efectuada.

No caso do sistema de controlo da CTRSU, tendo em conta que a grandeza a controlar são as emissões de NO<sub>x</sub> e HCl e SO<sub>2</sub>, no qual se actua na válvula de regulação de amónia e bomba doseadora de leite de cal, respectivamente, define-se o atraso como o tempo que ocorre entre a variação do caudal dos reagentes e a variação observada nas emissões dos gases. Este atraso é consequência do tempo em que os gases levam a percorrer o ponto onde é feita a injeção de amónia ou de leite de cal até ao ponto de extracção dos gases, na chaminé, mais o tempo de atraso imposto pelo sistema de monitorização das emissões.

O tempo de espera, desde o momento de extracção até ao momento da determinação da concentração dos gases, corresponde a um atraso no processo significativo, ao ponto de afectar o controlo óptimo da quantidade ideal dos reagentes a ser utilizado. Assim sendo, face a esta dificuldade, o ajuste da quantidade dos reagentes é sempre feito por excesso, para garantir uma redução dos gases ácidos em conformidade com a regulamentação, o que traduz num aumento de custo destas matérias primas para a CTRSU.

O atraso é um fenómeno comum em muitos processos industriais, sistemas de engenharia, entre outros. Em processos industriais o atraso é devido ao próprio processo a controlar e em alguns casos particulares este fenómeno pode ser devido ao atraso nas medidas, tempo de análise computacional ou atrasos de comunicação, entre outros. No caso de existência de reacções química e físicas em processos industriais, resultam num atraso significativo nas respostas do sistema, relativo à entrada ou perturbações geradas pelo processo (Machado, 2004).

A presença de atraso num processo limita o desempenho do sistema de controlo convencional, controlo por realimentação (feedback), tornando o controlo em malha fechada mais lento, tendo em conta que o ganho proporcional do controlador,  $K_p$ , é reduzido para valores inferiores ao ganho proporcional de sistemas sem atrasos. Dificulta a análise e o projecto de controladores e dificulta também o controlo ideal de um sistema.

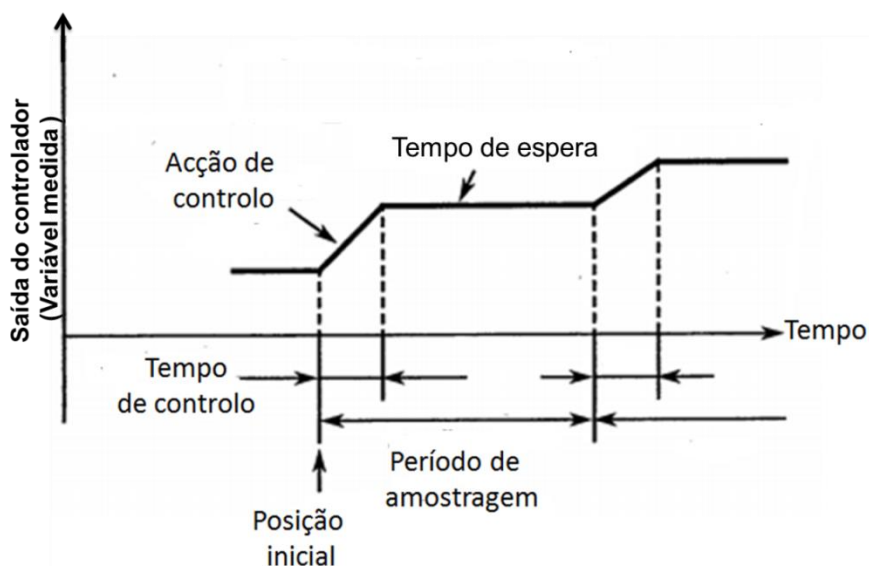
Tendo em conta esta situação, a CTRSU adaptou o sistema convencional de controlo dos gases existente para o sistema de controlo *Sample and Hold* PID, em que apesar de haver na mesma o problema do atraso, reduz-se a ocorrência de *overshoots*.

---

<sup>18</sup> Situação em que o valor da variável do processo ultrapassa o valor do *set point*, e é expresso como uma percentagem do valor do *set point*.)

O princípio básico do funcionamento de um controlador *Sample and Hold* PID, como o próprio nome já diz, baseia-se num período de amostragem em que se efectua a acção do controlador, e num período de “espera”, em que se aguarda a resposta da acção implementada. Este método é propício para processos com longos períodos de atraso, onde a mudança na variável manipulada não se reflecte de imediato na variável do processo.

Os parâmetros típicos do controlo *sample and hold* são: período de amostragem (*sampling period*) e tempo de controlo (*control time*), conforme ilustrados na Figura 31. O período de amostragem deve ser o mais longo possível, a fim de reduzir o *overshoot*.



**Figura 31:** Resposta típico de um controlado *Sample and Hold*.

No caso da CTRSU o período de amostragem é de 60 segundos. Nestes 60 segundos o controlador funciona durante 16 segundos (tempo de controlo) e nos restantes 44 segundos (tempo de espera), o valor da saída do controlador permanece constante. No tempo de espera o controlador aguarda a resposta da acção implementada, antes de proceder com nova acção de controlo. Assim evita-se *overshoots* no processo por alteração contínua do valor do actuador (abertura de válvula, velocidade de bomba doseadora). Tendo em vista se tratar de processos com atraso, as respostas não são imediatas. Ao enviar-se sucessivas acções de controlo para o actuador, verifica-se posteriormente *overshoots* na variável de saída do processo, variável que se pretende controlar. Isto é o que acontece com sistemas de controlo convencionais. Nos sistemas de controlo *Sample and Hold* esta situação é evitada, tendo em conta o referido anteriormente. Durante o tempo de controlo, 16 segundos, o controlador calcula nova saída ( $MV_n$ ) em cada segundo.

O algoritmo do controlador PI para o controlo da emissão dos gases ácidos, ( $NO_x$  e  $HCl$ ), é descrito da seguinte forma:

$$\Delta MV_n = K_P \times (Z_n - Z_{n-1}) + K_I \times (Z_n - Z_{SP}) \quad (26)$$

Em que:

$\Delta MV_n$ , é a variação da saída do controlador no instante n;

$Z_n$  e  $Z_{n-1}$ , correspondem às concentrações dos gases NOx ou HCl no instante n e instante 60 segundos antes de n, respectivamente;

$Z_{SP}$ , é o valor do *Set Point* dos gases NOx ou HCl.

Para o controlo da quantidade da amónia e leite de cal é utilizado o controlador PID cujo algoritmo é descrito da seguinte forma:

$$\Delta MV_n = K_p K_s \left\{ \Delta PV_n + \frac{\Delta T}{T_i} E_n + \frac{T_D}{\Delta T} \Delta (\Delta PV_n) \right\} \quad (27)$$

Em que:

$\Delta MV_n$ , é a variação da saída do controlador no instante n,  $MV_n = MV_{n-1} + \Delta MV_n$ ,

$K_p$ , é o ganho proporcional;

$K_s$ , é o factor de escala;

$E_n$ , é o erro no instante n,  $E_n = SV_n - PV_n$  onde SV é o set point e PV é o valor medido;

$\Delta PV_n$ , é a variação do valor medido no instante n,  $\Delta PV_n = PV_n - PV_{n-1}$ ,

$\Delta T$ , é o período do controlo (período da actualização do controlo em segundos);

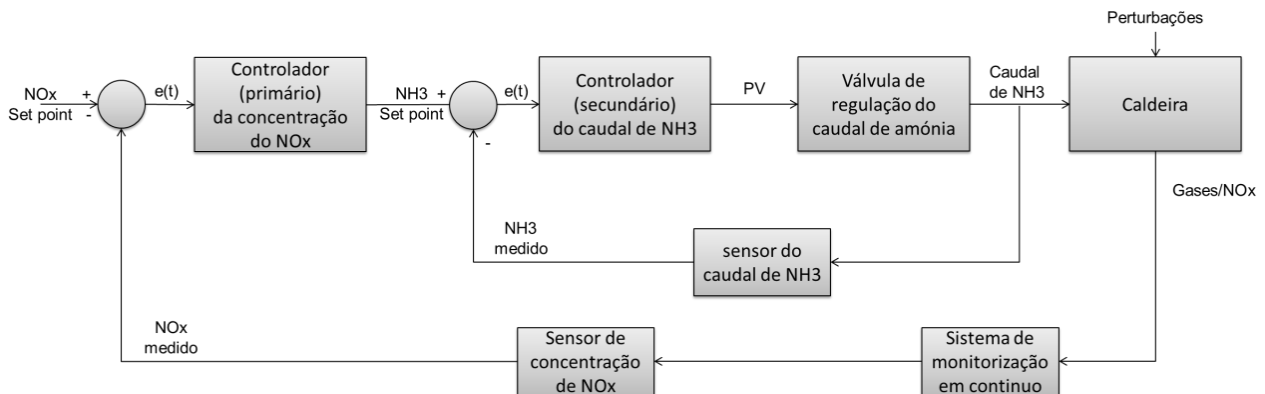
$T_i$ , é o ganho integral;

$T_D$ , é ganho derivativo

$\Delta (\Delta PV_n)$ , corresponde à segunda derivada do valor medido,  $\Delta (\Delta PV_n) = \Delta PV_n - \Delta PV_{n-1}$

#### 4.2.3.1 Sistema de controlo dos gases NOx

A Figura 32 representa o diagrama de bloco do processo de controlo do caudal de amónia e NOx:



**Figura 32:** Diagrama de bloco simplificado do sistema de controlo de emissão do gás NOx e caudal de amónia da CTRSU.

O controlador primário (controlador de NOx) lê a variável a controlar (concentração de NOx) e calcula o caudal de amónia que o controlador secundário (controlador de amónia) tem de controlar.

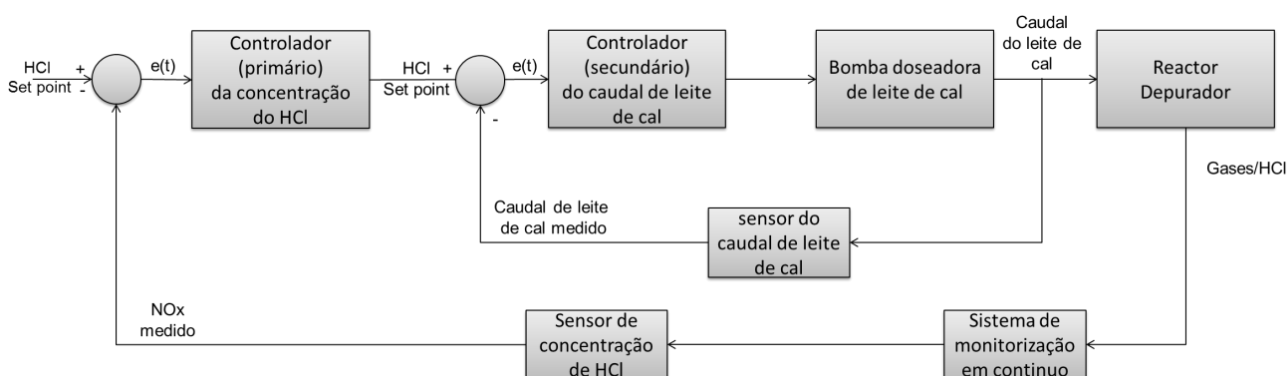
As variáveis de entrada do controlador primário são determinadas pela concentração do NO<sub>x</sub>, medida na chaminé e pelo valor de referência ou *set point* do mesmo. O *set point* é estabelecido pelo valor limite de emissão que constam na LA da CTRSU.

Para que o sistema cumpra o estabelecido em termos de emissões, o *set point* do controlador é colocado abaixo do VLE semi-horário de modo a que, mesmo em condições de variações de emissões, não haja um número de excedências que conduza ao incumprimento da legislação. A diferença entre o valor do *set point* e o VLE do poluente é uma margem de segurança, que assegura o cumprimento da lei. O valor do *set point* varia conforme as circunstâncias de emissões: se estas estão mais estáveis e consistentemente abaixo do VLE essa margem de segurança pode ser diminuída, enquanto se as emissões se aproximam e/ou excedem o VLE a margem de segurança deve ser aumentada.

O controlador do caudal dos reagentes tem como *set-point* o valor de saída do controlador NO<sub>x</sub> e controla o caudal da amónia através da abertura de uma válvula de regulação colocada antes do vaporizador de amónia. O valor da abertura da válvula, em corrente é de 4 mA para válvula totalmente fechada e de 20 mA para válvula totalmente aberta. A leitura do controlador de amónia é o próprio caudal de amónia.

#### 4.2.3.2 Sistema de controlo dos gases HCl/SO<sub>2</sub>

O sistema de controlo dos gases HCl e SO<sub>2</sub> é feito de forma análoga ao sistema de controlo dos gases NO<sub>x</sub>, com a diferença de que o sistema de controlo de tratamento destes gases é feito em simultâneo, uma vez que se utiliza o mesmo reagente, leite de cal, no tratamento destes gases. Ou seja, existem dois controladores, uma para o SO<sub>2</sub> e outro para o HCl. O sistema selecciona a cada instante o controlo que tem como saída o maior caudal de leite de cal. Para a análise deste sistema de controlo considerou-se apenas o controlo do HCl, (Figura 33), uma vez que o controlo do SO<sub>2</sub> é semelhante.



**Figura 33:** Diagrama de bloco simplificado do sistema de controlo de emissão do gás HCl e caudal de leite de cal da CTRSU.

A entrada do primeiro controlador é definida pela concentração do HCl, medida na chaminé. O *set point* é definido pelo VLE do poluente, considerando sempre um valor inferior a este, para se garantir a referida margem de segurança, tal como o caso do NO<sub>x</sub>.

A saída do controlador primário corresponde à quantidade do leite de cal a ser utilizada para a neutralização destes gases. Este caudal é enviado para um segundo controlador e representa o *set point* do mesmo. O controlador de caudal envia um sinal de 4 a 20 mA para o variador de velocidade da bomba doseadora de leite de cal, regulando assim o caudal deste reagente a ser enviado para o atomizador. A leitura do controlador de leite de cal é o próprio caudal de leite de cal.

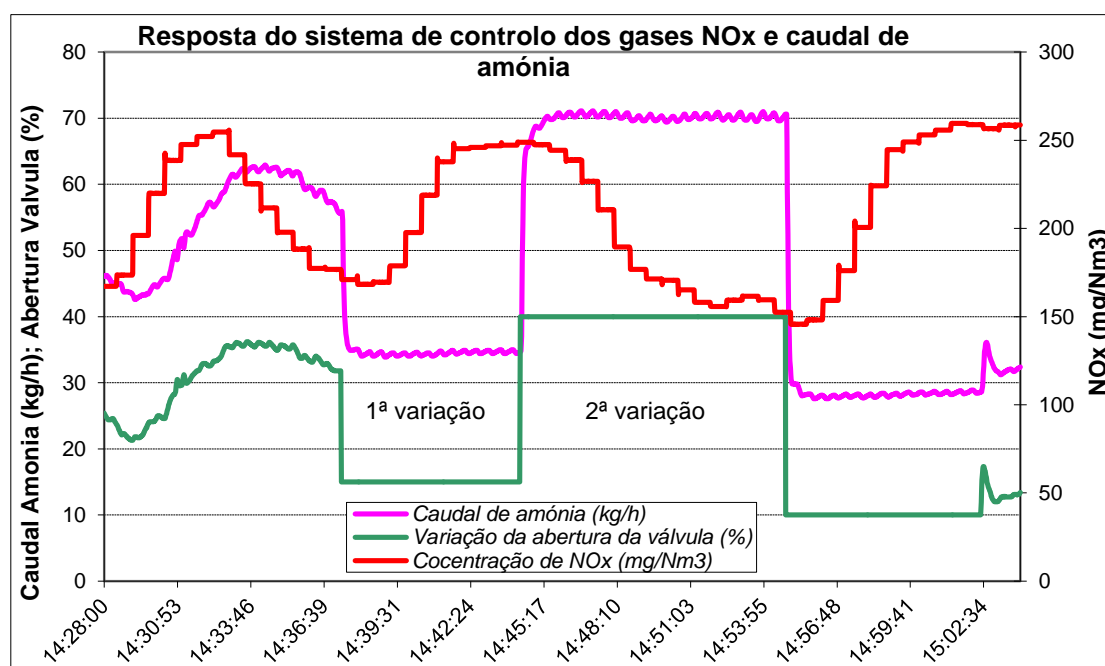
#### 4.2.3.3 Caracterização do sistema de controlo

A caracterização do sistema do controlo, assim como o estudo dos parâmetros do controlador foram efectuados, considerando como exemplo, o sistema de controlo de emissão dos gases NOx, visto este ser análogo ao do HCl/SO<sub>2</sub>. Neste sentido, os procedimentos efectuados para a caracterização, são idênticos para ambos os sistemas de controlo. Segue-se então, a descrição dos procedimentos efectuados.

Através de um simples ensaio feito ao sistema de controlo de tratamento dos gases NOx da CTRSU, conseguiu-se verificar a resposta real do sistema, em malha aberta. Com os controladores a funcionarem em modo manual, procedeu-se com variações na abertura da válvula de regulação do caudal de amónia, para a análise do comportamento dos controladores do caudal de amónia e emissão do NOx. O valor da variação da abertura da válvula é expressa em percentagem. Foram efectuadas duas variações na abertura da válvula:

- 1ª Variação: abertura da válvula de 15% para 40% (aumento de 25% na abertura)
- 2ª Variação: fecho da válvula de 40 % para 10% (diminuição de 30% na abertura)

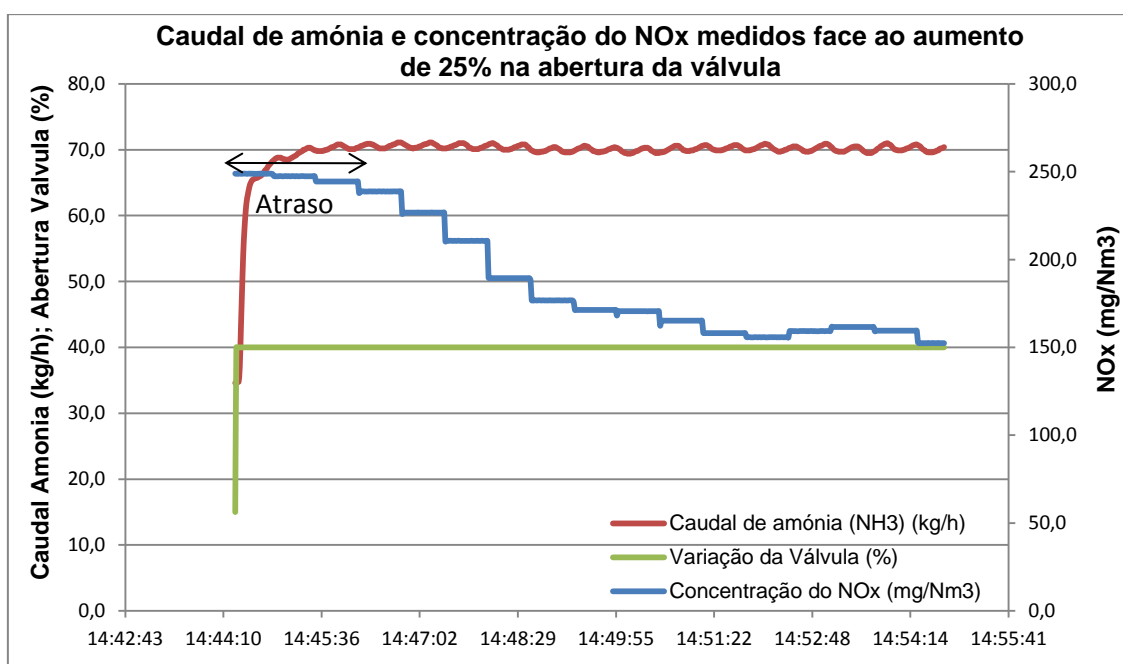
O gráfico da figura que se segue, (Figura 34), ilustra a resposta ou a saída dos controladores de caudal de amónia e concentração do NOx em função das referidas variações.



**Figura 34:** Resposta do sistema de controlo dos gases NOx, em função das variações da abertura da válvula de regulação do caudal de amónia.

Verifica-se que a variação das emissões dos gases NOx é inversamente proporcional à variação da abertura da válvula, ou seja quando se aumenta a abertura da válvula, (1ª variação), a concentração do NOx diminui e quando se diminui a abertura da válvula, (2ª variação), a concentração do NOx aumenta, como consequência do aumento e diminuição do caudal de amónia, respectivamente.

Para uma melhor caracterização do sistema de controlo do NOx e percepção das respostas considerou-se como exemplo a 1ª variação, aumento de 25% na abertura da válvula, representada na Figura 35. Os resultados relativamente à esta variação encontram-se no anexo 2 do presente trabalho.



**Figura 35:** Resposta do sistema de controlo de tratamento do NOx para variação na abertura da válvula de regulação do caudal de amónia, de 15% a 40%.

Para um aumento de 25% na abertura da válvula, verifica-se um aumento do caudal de amónia de 34,6 Kg/h para aproximadamente 70 kg/h, ou seja, uma variação de cerca de 35 Kg/h do caudal. Consequentemente verifica-se uma diminuição da concentração de NOx na chaminé, de 248,9 mg/Nm<sup>3</sup> para aproximadamente 152,4 mg/Nm<sup>3</sup>, ou seja, uma variação de aproximadamente -97 mg/Nm<sup>3</sup>. A resposta do controlador do caudal de amónia é mais rápida do que a do controlador de NOx. A saída do controlador dos gases NOx demora mais tempo a estabilizar, enquanto a do caudal de amónia estabiliza apenas alguns segundos depois.

O sistema de controlo dos gases NOx possui um atraso de aproximadamente 2 minutos, ou seja 120 segundos, conforme o ilustrado no gráfico da Figura 35, em que a partir do instante em que se actua na válvula, (14:44:20), a concentração de NOx só começa a variar cerca de 1 minuto e 41 segundos depois, (14:46:01), caso que não se verifica na resposta do controlador do caudal de amónia, em que praticamente não há atraso na variação do caudal de amónia.

Através do *software Simulink* do *MATLAB*, foi possível efectuar a simulação em malha aberta do processo de controlo do caudal de amónia e concentração do NOx, com o objectivo de reproduzir as respostas da experiência anterior.

Para a simulação do sistema de controlo é preciso determinar a Função de Transferência,  $Gp(s)$ , que caracteriza o processo a controlar. A Função de Transferência representa a relação matemática entre a variável de saída e de entrada de um sistema. Neste caso a variável de saída são a concentração do NOx e o caudal de amónia e variável de entrada corresponde à variação da abertura da válvula.

As funções de transferência foram determinadas baseando em modelos empíricos não lineares, a partir dos dados experimentais obtidos pelo referido ensaio feito ao sistema de controlo de emissão dos gases NOx e caudal de amónia.

Geralmente um modelo não linear é definido por:

$$y = f(u_1, u_2, \dots, \beta_1, \beta_2, \dots) \quad (28)$$

Em que,  $y$  é o modelo de saída do processo,  $u_j$  é a saída do processo e  $\beta_j$  são os parâmetros a serem estimados. No caso do processo de controlo em questão,  $y$  são os valores da concentração dos gases NOx e caudal de amónia.  $\beta_j$  irá corresponder aos parâmetros das funções de transferência que se pretende determinar. O  $\beta_j$  não aparece linearmente no modelo mas, é possível definir o critério quadrado da soma do erro,  $(S)$ , a ser minimizado seleccionando os parâmetros  $\beta_j$ , de acordo com a seguinte expressão:

$$\text{Min } S = \sum_{i=0}^N (Y_i - \hat{Y})^2 \quad (29)$$

Onde  $Y_i$  é a saída medida do processo e  $\hat{Y}$  é a saída do processo estimada ou aproximada do  $Y_i$  (Seborg et. al., 2004). A expressão analítica de 1ª ordem que permite determinar  $\hat{Y}$  é a que segue:

$$\hat{Y}(t) = K_p * \Delta u * (1 - e^{-\frac{t-\theta}{\tau_p}}) \quad (30)$$

Em que,  $\Delta u$  corresponde à variação da abertura da válvula,  $\theta$  é o tempo de atraso do processo,  $\tau_p$  é a constante de tempo e  $t$  é o tempo do controlo (Bequette, 2003).

Considerou-se que as respostas do sistema de controlo são de 1ª ordem, com atraso para o controlador de NOx e sem atraso para o controlador do caudal de amónia. As funções de transferência de 1ª ordem com atraso, (equação 31), e sem atraso, (equação 32), são representas por:

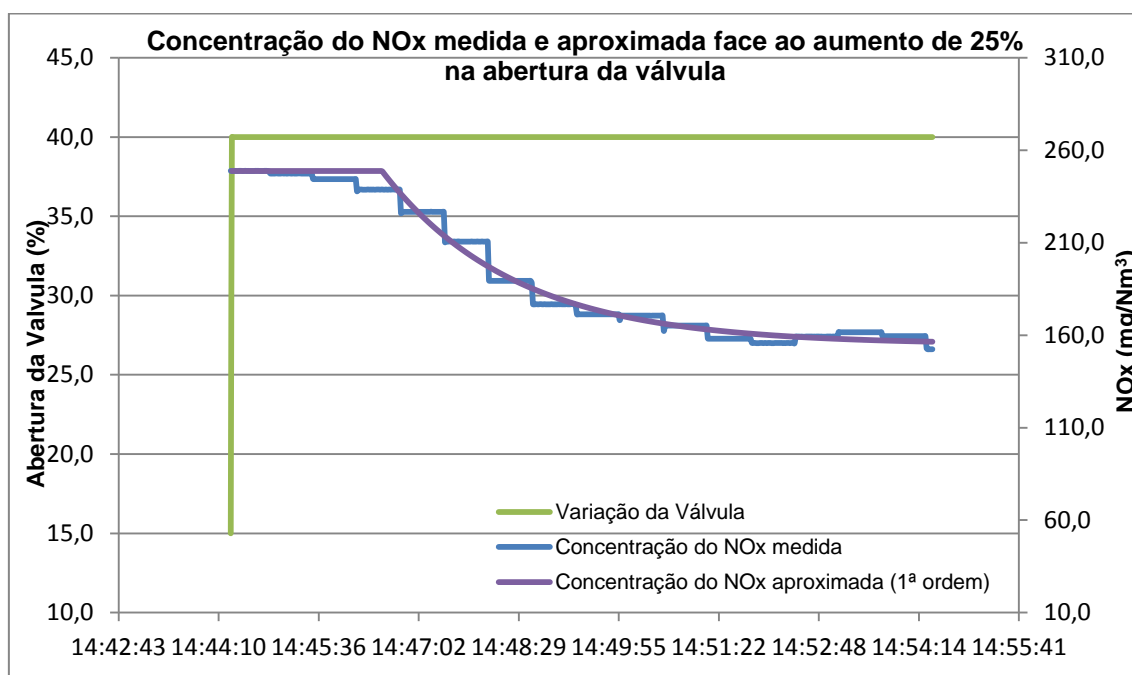
$$Gp(s) = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} e^{-\theta s} \quad (31)$$

$$Gp(s) = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \quad (32)$$

Em que  $G_p$  é a função de transferência do processo,  $K_p$  é o ganho do processo,  $T_p$  é a constante de tempo do processo e  $\theta$  é o atraso do processo (Bequette, 2003).

Para determinação dos parâmetros da função de transferência  $\beta_j$ , ( $K_p$ ,  $T_p$  e  $\theta$ ), utilizou-se a função *Solver* do Excel, para minimizar a soma do quadrado do erro entre as saídas medidas dos controladores do caudal de amónia e concentração no NOx, ( $Y_i$ ) e as saídas estimadas dos mesmos ( $\hat{Y}$ ), para um tempo de controlo inicial igual a zero. (Os valores das concentrações do NOx e caudal de amónia estimados encontram-se no anexo 3 do presente trabalho).

O gráfico que segue, Figura 36, representa o ajuste, entre a concentração do NOx medida e a concentração do NOx aproximada.



**Figura 36:** Ajuste entre a concentração do NOx medida e NOx aproximada.

De acordo com o gráfico anterior verifica-se que, o ajuste de 1ª ordem entre a concentração do NOx medida e concentração do NOx aproximada é aceitável, do qual se obteve os seguintes parâmetros da função de transferência que relaciona a variação da abertura da válvula com a concentração de NOx medida:

$$G_{p_{NOx}}(s) = \frac{-3.75}{114.7s + 1} e^{-129.7s} \quad (33)$$

Através do referido método obteve-se um atraso de 129.7 segundos, (aproximadamente 2.2 minutos), como já concluído anteriormente. O ganho do processo é negativo tendo em conta que a variação da saída do controlador face à variação da abertura da válvula também é negativa, (-97mg/Nm<sup>3</sup>).

Relativamente ao controlador do caudal de amónia, obteve-se o seguinte ajuste entre o caudal de amónia medido e o caudal de amónia aproximado, representado no gráfico que se segue, Figura 37.

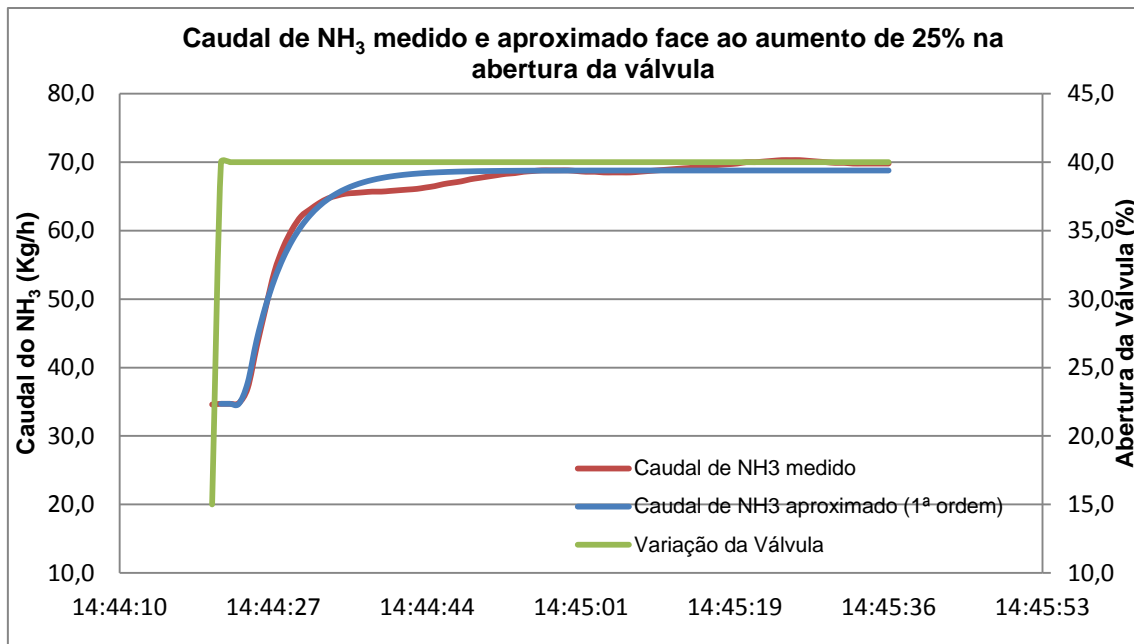


Figura 37: Ajuste entre o caudal de NH<sub>3</sub> medido e NH<sub>3</sub> aproximado.

De acordo com o gráfico anterior, verifica-se que o ajuste de 1ª ordem entre o caudal de amónia medido e o caudal de amónia aproximado é aceitável, do qual se obteve os seguintes parâmetros da função de transferência que relaciona a abertura da válvula com o caudal de amónia medido:

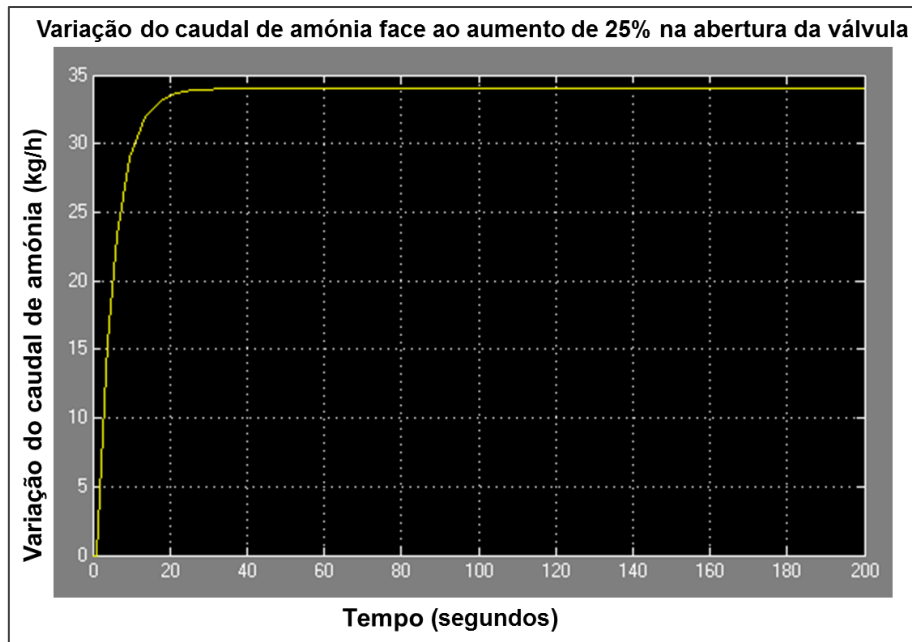
$$Gp_{NH_3}(s) = \frac{1.36}{4.5 S + 1} \quad (34)$$

Tendo em conta o processo de controlo representado na Figura 32, é necessário determinar uma terceira função de transferência, ( $Gp$  do processo), que representa a relação entre a variação do caudal de amónia e a variação da concentração de NOx. Esta função de transferência é descrita por:

$$Gp(s) = \frac{Gp_{NOx}}{Gp_{NH_3}} = \frac{-3.75 * (4.5 S + 1)}{1.36 * (114.7 S + 1)} = \frac{-16.9 S - 3.75}{155.9 S + 1.36} e^{-129.7s} \quad (35)$$

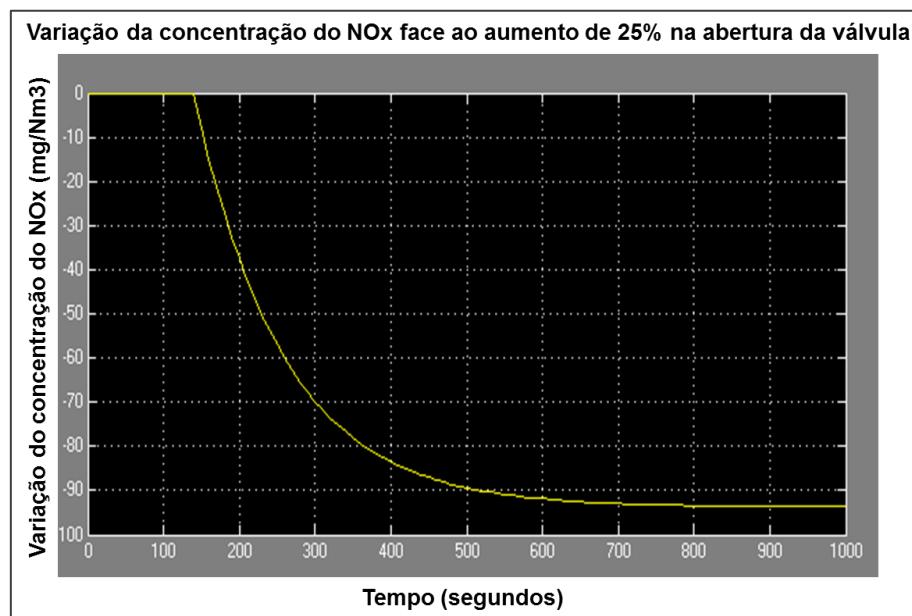
Através do *Simulink* efectuou-se a simulação do referido processo de controlo, em malha aberta utilizando as funções de transferências determinadas anteriormente, (equação 34 e 35) e controlador proporcional com ganho unitário, ( $K_c = 1$ ). Apesar de o sistema de controlo da CTRSU ser um sistema de controlo discreto, para simulação considerou-se um sistema de controlo em modo contínuo, com controlador proporcional disponibilizada na biblioteca do *Simulink*.

As respostas obtidas encontram-se ilustradas nas figuras que se seguem. O *flowsheet* utilizado para obtenção destas respostas, encontra-se no anexo 4 do presente trabalho.



**Figura 38:** Variação do caudal de amônia face ao aumento de 25% na abertura da válvula.

Analisando o gráfico da Figura 38, verifica-se que a saída do controlador do caudal de amônia corresponde aproximadamente ao resultado obtido experimentalmente, ou seja ao se aumentar 25% na abertura da válvula, o caudal de amônia varia aproximadamente 35Kg/h. O sistema é rapidamente estabilizado e a resposta praticamente não possui atraso concluindo que a função de transferência determinada, (equação 34), caracteriza-o eficazmente.



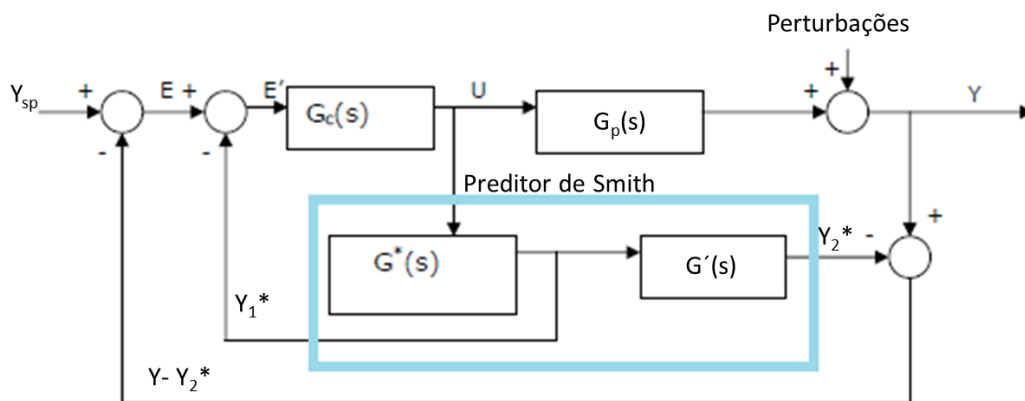
**Figura 39:** Variação da concentração do NOx face ao aumento de 25% na abertura da válvula.

Pela análise do gráfico da Figura 39, verifica-se que para uma abertura na válvula de 25% a concentração de NOx varia aproximadamente -95mg/Nm<sup>3</sup>, reproduzindo aproximadamente o resultado experimental. O sistema demora mais tempo a estabilizar e possui o respectivo atraso de aproximadamente 130 segundos. Conclui-se neste sentido que a função de

transferência determinada, (equação 35), caracteriza a variação da concentração do NOx, com a abertura da válvula.

#### 4.2.3.4 Solução teórica para redução do tempo de atraso

Uma possível solução teórica para redução do tempo de atraso, consiste na introdução de um compensador de atraso, no processo de controlo, baseado na técnica de predição de Smith. Esta técnica é conhecida como uma das melhores e é muito utilizada pelas indústrias, para eliminar o tempo de atraso da entrada de um controlador, segundo Seborg et.al (2004). Vários investigadores descobriram que o desempenho dos controladores que incorporam o preditor de Smith para mudança do *set point* é melhor que o controlo convencional PI baseado no critério integral do erro. Este método de controlo consiste na introdução de uma malha interna fechada, preditor de Smith, no sistema de controlo afectado pelo atraso, que irá diminuir o atraso que o sistema apresenta. O método de Smith é designado preditivo porque prevê mudanças futuras na variável medida, através do modelo do processo. A estrutura de um sistema de controlo baseado no referido método é a que se segue, Figura 40:



**Figura 40:** Diagrama de bloco de um sistema de controlo com preditor de Smith.

Em que:

$Y$ , são os sinais de entrada e saída do processo;

$G_c(s)$ , é a função de transferência do controlador;

$G_p(s)$ , é a função de transferência do processo,

$G'(s)$ , é o modelo do processo com atraso, descrita por  $e^{-\theta s}$ ;

$G^*(s)$ , é o modelo do processo sem atraso;

$E$ , é o erro do processo.

O modelo do processo de controlo,  $G(s)$ , é dividido em duas partes: uma parte sem o atraso,  $G^*(S)$  e a outra parte com atraso,  $G'(S) = e^{-\theta s}$ , e a função de transferência total do processo é descrita por:

$$G(s) = G^*(s) * e^{-\theta s}. \quad (36)$$

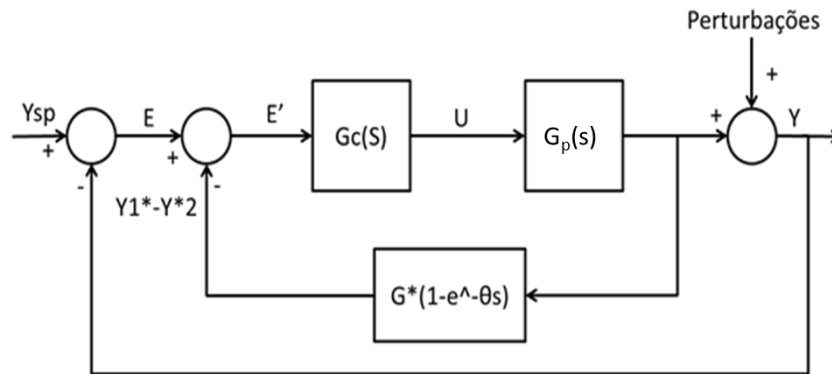
O modelo do processo sem atraso,  $G^*(s)$ , é utilizado para prever o efeito da acção de controlo na saída do sistema, ( $Y$ ). O controlador,  $G_c(s)$ , usa posteriormente a resposta prevista, ( $y_1^*$ ), do modelo sem atraso, para calcular o seu sinal de saída.

O cálculo do erro para o sistema sem atraso, ( $E'$ ), é efectuado da seguinte forma:

$$E' = E - Y^*_1 = Y_{sp} - Y^*_1 - (Y - Y^*) \quad (37)$$

Se o modelo do processo for ideal e não houver perturbações no sistema, tem-se então que  $Y^*_2 = Y$ , e o erro pode ser simplificado na forma de:  $E' = Y_{sp} - Y^*_1$ . Neste caso o controlador responde ao sinal do erro que poderia ocorrer se o sistema não tivesse atraso.

Assumindo ainda um processo ideal, em que não há erro, ou seja  $G(s) = G_p(s)$ , o modelo de predição de Smith pode ser simplificada e a malha de controlo interna passa a ser um pouco semelhante à do controlo em cascata.



**Figura 41:** Diagrama de bloco simplificado de um sistema de controlo com preditor de Smith.

A função de transferência que caracteriza a malha interna é representada pela seguinte expressão:

$$G' = \frac{U}{E} = \frac{G_c}{1 + G_c G^* (1 - e^{-\theta s})} \quad (38)$$

A partir da equação anterior, (38), depois de alguns rearranjos, obtém-se a função de transferência do *set point* em malha fechada:

$$\frac{Y}{Y_{sp}} = \frac{G_c G^* e^{-\theta s}}{1 + G_c G^*} \quad (39)$$

Enquanto num controlo convencional por realimentação esta função de transferência é representada da seguinte forma:

$$\frac{Y}{Y_{sp}} = \frac{G_c G^* e^{-\theta s}}{1 + G_c G^* e^{-\theta s}} \quad (40)$$

Pela análise das duas equações anteriores, 39 e 40, verifica-se que o modelo de predição de Smith possui a vantagem de eliminar teoricamente o atraso da equação característica do sistema. No entanto, este método exige o conhecimento do modelo dinâmico do processo, tendo em conta que o método baseia em modelos e se a dinâmica do processo mudar

significativamente, o modelo de predição de Smith torna incerto, podendo causar instabilidade no sistema (Seborg et. el., 2004).

Para o caso do sistema de controlo de emissão do NOx, pode obter-se teoricamente o modelo do processo sem atraso, a partir do método de Smith, substituindo a função de transferência do processo, (equação 35), na expressão analítica que descreve a função de transferência do *set point* em malha fechada, representada por:

$$\frac{Y}{Y_{sp}} = \frac{G_c * G_p}{1 + G_c * G_p} \quad (41)$$

Em que  $G_p$  é a função de transferência do processo e  $G_c$  é a função de transferência do controlador PI, utilizado no controlo da concentração de NOx, representada pela seguinte expressão:

$$G_c = K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} \right] \quad (42')$$

Onde  $K_p$ ,  $T_i$  e são os parâmetros do controlador PI. Sabendo os parâmetros do controlador PI e substituindo as equações 35 e 42 na equação 41, obtém-se o modelo do processo sem atraso, que posteriormente poderá ser utilizada no sistema de controlo com preditor de Smith, para se avaliar a resposta do sistema, ou seja se o atraso é reduzido nas respostas do controlador.

As figuras que se seguem representam, o diagrama de blocos do controlo de emissão do NOx e caudal de amónia, em malha fechada, e uma sugestão do respectivo diagrama com a introdução do preditor de Smith:

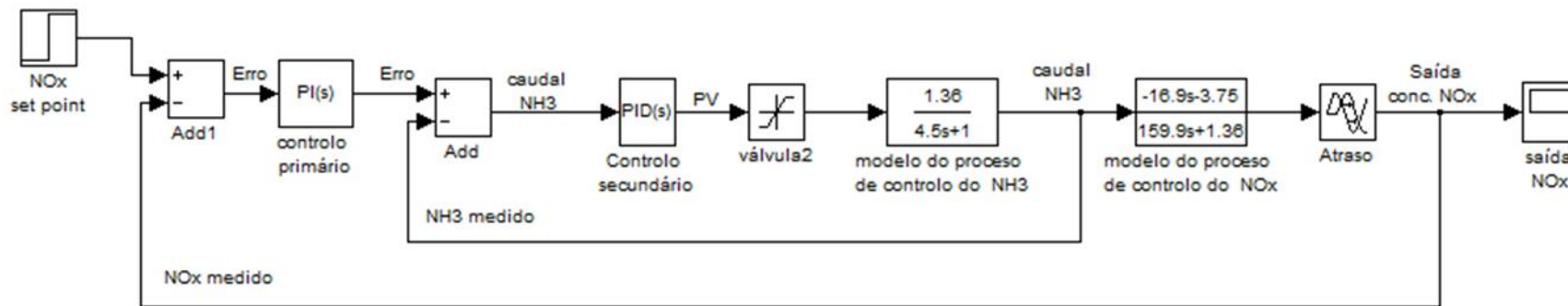


Figura 42: Diagrama de blocos do sistema de controlo, em malha fechada, da emissão do NOx e caudal de amónia.

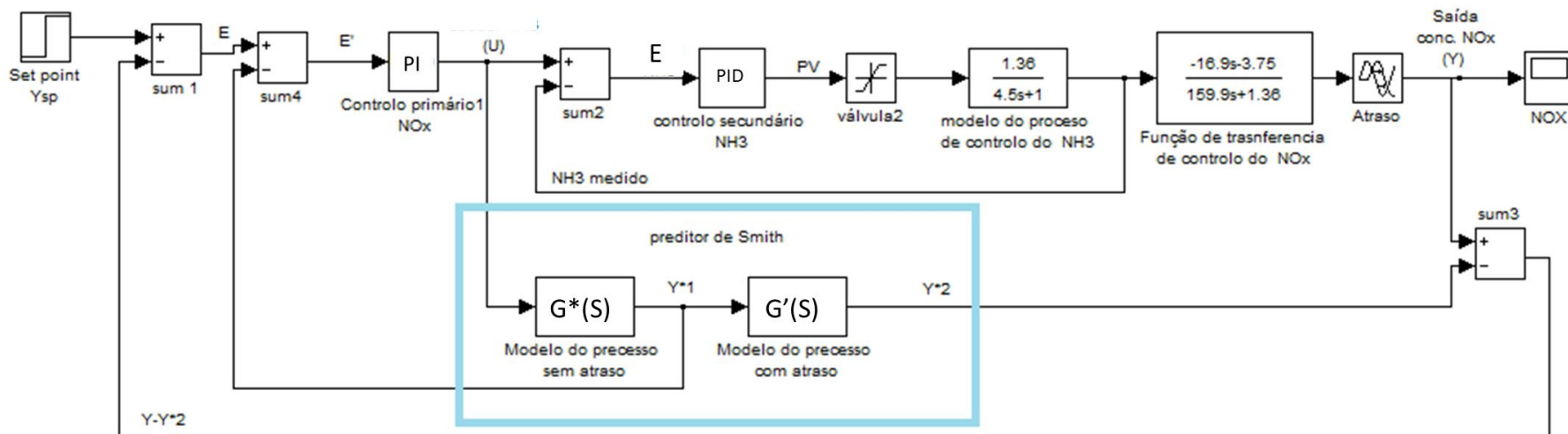


Figura 43: Diagrama de blocos alternativo do sistema de controlo de emissão do NOx e caudal de amónia pelo método de predição de Smith<sup>19</sup>.

<sup>19</sup> O método de predição de Smith só é vantajoso quando o modelo do processo é conhecido, no entanto este procedimento de trabalho e uma análise mais precisa do referido método fica como uma sugestão futura de trabalho a ser desenvolvido.

O método de predição de Smith é utilizado quando os sistemas de controlo apresentam tempos de atraso tais que impossibilitam um controlo eficiente das variáveis a controlar.

No entanto, para o método de predição de Smith ser eficiente, é necessário que os parâmetros da função de transferência do processo sejam constantes ou não tenham variações significativas. Se os parâmetros do modelo do processo sem atraso diferirem significativamente dos parâmetros da função de transferência do processo, a saída da malha de controlo divergirá também significativamente da saída óptima tornando inútil a utilização deste método de predição.

O método poderá ser aplicado no sistema de controlo de emissão dos gases da CTRSU se os parâmetros das funções de transferência que caracterizam os processos de controlo forem constantes.

A heterogeneidade dos RSU leva a que as condições de incineração não sejam constantes, o que pode conduzir a parâmetros não constantes da função de transferência do processo. Por exemplo, a variação do caudal do ar de combustão conduz a uma variação do tempo de atraso das funções de transferência dos gases poluentes.

Se as variações que a heterogeneidade dos RSU provocam nos parâmetros das funções de transferência dos gases poluentes, não forem significativas, então uma possível forma de optimização do controlo dos gases poluentes poderá ser pela utilização do método de predição de Smith, o que poderá conduzir a uma redução dos reagentes utilizados nestes processos, a amónia para o controlo do NO<sub>x</sub> e a cal para o controlo do HCl/SO<sub>2</sub>.

#### **4.2.3.5 Trabalhos futuros**

Hoje em dia, existem várias técnicas de reduzir o tempo de atraso de um sistema, nomeadamente pelo método de predição de Smith, descrita teoricamente na secção anterior, pela implementação de sistemas de controlo de inteligência artificial, como por exemplo os sistemas de redes neurais, lógica difusa ou lógica *fuzzy*, entre outros. No entanto, como trabalho futuro a ser desenvolvido, poderá ser analisado através de sistemas de redes neuronais, o comportamento do sistema de controlo em estudo, e optimização deste, de modo a eliminar ou reduzir o tempo de atraso verificado.

Os sistemas de redes neuronais baseiam em conexões de entradas e saídas que simulam os processos neurais da mente Humana, para controlo de processos não lineares. Estes sistemas possuem várias capacidades nomeadamente, a de filtrar dados essenciais a partir de um conjunto maior de dados que contém informações irrelevantes; capacidade de aprender e generalizar a partir de experiências anteriores prevendo novos resultados; capacidade de adaptar a diferentes tarefas por selecção numérica das conexões de entradas e saídas com maior peso e capacidade rápida de resolução de problemas (Chan, 2003). Neste sentido, a utilização deste sistema de controlo pela CTRSU para o controlo das emissões dos gases, permite determinar as relações entre as várias grandezas do processo, permitindo implementar sistemas de controlo que não são afectados pelo tempo de atraso.

## Capítulo 5: Conclusões

Num mundo com uma economia cada vez mais desenvolvida e padrões de consumos variados, a produção de RSU tem vindo a aumentar ao longo dos anos e Portugal não foge à regra. No entanto, nos últimos três anos verificou-se um decréscimo na produção dos RSU, como consequência da crise económica que o País atravessa. Sistemas de gestão de RSU têm sido implementados para o tratamento destes, priorizando sempre a valorização dos resíduos e um destino final seguro para a fracção de resíduos que não é possível valorizar. Portugal ainda tem um longo caminho a percorrer, no que diz respeito à valorização dos RSU, nomeadamente a reciclagem, valorização orgânica e energética, quando comparada com outros países desenvolvidos da União Europeia (28 países) nomeadamente, Alemanha, França, entre outros. A deposição directa em aterros é o meio de tratamento ainda mais utilizado. No entanto a valorização energética por incineração de RSU tem vindo a crescer e actualmente, cerca de 21% do total de RSU produzido, é valorizado energeticamente.

A CRTU da Valorsul, uma das três centrais de tratamento e valorização energética dos RSU existentes em Portugal, contribui de forma eficiente para a redução do volume dos RSU a ser depositados no aterro da região de Grande Lisboa e produção de energia eléctrica, representando cerca de 2% do consumo doméstico nacional. Os gases produzidos durante a combustão de resíduos são tratados de forma eficiente, por um sofisticado sistema de tratamento e os valores limite de emissões diários são cumpridos.

A formação dos gases, durante a incineração de RSU, é influenciada por vários factores nomeadamente a composição física e química dos RSU, a humidade presente nos RSU, a temperatura de queima e o excesso de ar. Os gases tais como, HCl, HF, SO<sub>2</sub> e o NO<sub>x</sub>, formam durante a combustão devido à presença, nos RSU a incinerar, de compostos como os cloretos orgânicos e inorgânicos e de materiais como os papéis/cartões, têxteis, tintas entre outros, que possuem na sua constituição átomos de cloro, fluor, enxofre e azoto. Estes compostos químicos são libertados durante a combustão de resíduos, a altas temperaturas, e combinam quimicamente com átomos de hidrogénio e oxigénio, presentes no meio combustivo, originando os referidos gases. A triagem e reciclagem destes materiais dos RSU a serem incinerados, contribuem para redução de emissão destes gases.

Os sistemas de tratamento dos gases de combustão adoptados actualmente pelas centrais de incineração são de elevadas eficiências, (cerca de 77% a 99%), garantindo baixas emissões dos gases, cujos valores não representam quaisquer perigos para saúde pública e ambiental.

A eficiência do sistema de tratamento dos gases, HCl SO<sub>2</sub> e HF, depende fortemente da temperatura de reacção do leite de cal com os gases. Esta eficiência é tanto maior quanto menor for a temperatura. O tratamento dos gases NO<sub>x</sub> exige um grande consumo de amónia, superior ao estequiométrico, o que leva a fuga de amónia para a chaminé. Estes gases são prejudiciais, levando a corrosão de equipamentos numa incineradora e formação de chuvas ácidas.

O sistema de controlo de emissão dos gases ácidos, *Sample and Hold* PID, implementado na CTRSU da Valorsul apresenta um tempo de atraso de aproximadamente 2 minutos no processo, o que dificulta a optimização do caudal de amónia e leite de cal utilizado no tratamento dos gases ácidos HCl e NOx, respectivamente. Esta situação contribui para o uso de quantidades excessivas destes reagentes, elevando os custos operacionais da referida unidade de valorização energética.

Através da simulação de controlo de emissão dos gases ácidos e caudal de amónia, em malha aberta no *simulink* do *MATLAB*, analisou-se as respostas dos controladores e verificou-se que estas estão de acordo com os resultados obtidos através de um controlo real em malha aberta realizado na CTRSU. A variação do caudal de amónia e a variação da concentração do NOx correspondem à variação efectuada na válvula de regulação do caudal de amónia, (aumento de 25% na abertura), concluindo-se que o sistema implementado no *simulink* reproduz aproximadamente os resultados obtidos através do controlo real.

Como possível solução teórica para redução do tempo de atraso, sugeriu-se a aplicação do método de predição de Smith, aplicando o modelo do processo sem atraso. Com este método, poderá ser possível reduzir o atraso do sistema de controlo dos gases, se o modelo do processo não variar significativamente. Tendo em conta a heterogeneidade dos RSU's, as condições de incineração não são constantes, o que pode conduzir a parâmetros não constantes da função de transferência do processo, inviabilizando o referido método.

Uma outra solução, proposta como trabalho futuro a desenvolver, consiste na implementação de um novo sistema de controlo, recorrendo a técnicas de inteligência artificial, como por exemplo as redes neuronais, que permitem determinar as relações entre várias grandezas do processo de controlo e prever a variação da grandeza a controlar, eliminando assim o atraso do sistema.

De uma forma geral, os objectivos traçados para este trabalho foram cumpridos, tendo-se apresentado possíveis soluções teóricas para a redução do atraso verificado no sistema de controlo de emissão dos gases ácidos. A implementação prática das referidas soluções teóricas foi sugerida como possíveis trabalhos futuros a serem desenvolvidos na área de optimização de sistemas com atraso.

Relativamente à Cabo verde, cheguei à conclusão que devido ao elevado custo de investimento de construção de uma central de incineração de RSU com valorização energética, tal não é viável para o País, devido à falta de recursos que possam assegurar esta construção. Cabo Verde é habitado por 491.875 mil habitantes<sup>20</sup> e possui um sistema de gestão de RSU ainda pouco desenvolvido. Apenas 66% da população é beneficiada com sistemas de recolha indiferenciada de RSU, o único existente, o que resulta numa produção anual de RSU de 66.836<sup>21</sup> toneladas por ano. Esta produção de RSU encontra-se dispersa pelas várias ilhas que

---

<sup>20</sup> (INE, 2014), Instituto Nacional de Estatística de Cabo Verde, INE, <http://www.ine.cv/dadostats/dados.aspx?d=1>.

<sup>21</sup>(Correia, 2012). "Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos e Perspectiva de Melhoria. Caso de Estudo Assomada – Cabo Verde" Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

constituem o País e a sua concentração num único local é economicamente proibitiva. No entanto, com a melhoria dos sistemas de recolha, que se espera acontecer no futuro próximo, e com o desenvolvimento em curso de sistemas de incineração de resíduos de reduzida dimensão, poderá ser possível o desenvolvimento de sistemas de valorização energética de resíduos, pelo menos na ilha mais habitada, a ilha de Santiago. Esta análise de detalhe poderá igualmente constituir trabalho para desenvolvimento futuro.

## Bibliografia

### Documentação técnica e científica

APA- Agência Portuguesa do Ambiente, (2010). “Relatório Anual de Resíduos Urbanos. Caracterização da Situação dos Resíduos Urbanos em Portugal Continental em 2009”. Agência Portuguesa do Ambiente, I. P. Amadora.

APA - Agência Portuguesa do Ambiente, (2011). “Relatório Anual de Resíduos Urbanos. Resíduos Urbanos em 2010”. Agência Portuguesa do Ambiente, I. P. Amadora.

APA - Agência Portuguesa do Ambiente, (2013a). “Resíduos Urbanos - Relatório Anual 2012”, (RARU). Agência Portuguesa do Ambiente, I. P. Amadora.

APA, - Agência Portuguesa do Ambiente, (2013b). “Relatório do Estado do Ambiente 2013” (REA). Agência Portuguesa do Ambiente, I. P. Lisboa

APA - Agência Portuguesa do Ambiente, (2013c). “Relatório Anual de Resíduos Urbanos. Resíduos Urbanos - Relatório Anual 2011”. Agência Portuguesa do Ambiente, I. P. Amadora.

Bequette, W. B., (2003). “*Process Control, Modeling, Design and Simulation*”, 1ª Edição. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.2003. pp. 97 - 113.

BREF - Best Available Technologies (BAT) Reference documents, (2006). “*Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration*”. European Commission. (Documento de referência sobre as melhores técnicas disponíveis para a incineração de resíduos).

Buekens, A., Huang, H., (1998). “*Comparative evaluation of techniques for controlling the formation and emission of chlorinated dioxins/furans in municipal waste incineration*”. Journal of Hazardous Materials, (62): 1 – 33.

Cabrita I., Gulyurtlu I., Pinto F., Boavida D., Costa P., Racha L., (2003). “Formação e destruição de dioxinas em processos de combustão e co-combustão.” Revista da Faculdade de Medicina de Lisboa, Série III, Vol. 8 nº 4, pp. 225-235.

Cardoso, B. R. L., (2012). “Caracterização das Emissões Gasosas da Central de Valorização Energética da Lipor - Análise da Eficiência do Sistema de Tratamento de Gases”. Tese de Mestrado. Universidade do Porto, Porto.

Carvalho, C. M. L., Campos, E. S. T., Martins, D. S., Raposo, A. M. F., Viveiros, A. P. R., Batoréu, M. C. C., (2001). “Dioxinas: Origens e efeitos na população Humana. Laboratório de Toxicologia”. Faculdade de Farmácia da Universidade de Lisboa: Jorge Gaspar, Lisboa.

Chan, W. C., Huang, H. G., (2003). “*Artificial intelligence for management and control of pollution minimization and mitigation processes*”. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, (16): 75–90.

Cruz, M. (2005). “A caracterização de resíduos sólidos no âmbito da sua gestão integrada”. Tese de Mestrado Universidade do Minho, Minho.

Correia, L. P. R., (2012). “Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos e Perspectiva de Melhoria. Caso de Estudo Assomada – Cabo Verde” Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Dias, L. F. P. M. H., (1997). “Escórias da Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos. Alternativas de gestão”. Tese de Mestrado. Universidade de Porto, Porto.

ERSAR – Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos, (2013). “Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal- RASARP (2012). Volume I - Caracterização Geral do Sector”. ERSAR, Lisboa.

Ferreira, J. C., (2007). “Relação Qualidade do Ar e Exposição Humana a Poluentes Atmosféricos”. Tese de Doutorado. Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, Aveiro.

Glarborg, P., Jensen, A., Johansen, K., D., (2001). “*Formation of NO From Combustion of Volatiles From Municipal Solid Wastes*”. *The Combustion and Flame*, (123): 195 – 212.

IBAM - Instituto Brasileiro de Administração Municipal, (2001). “Manual Gerenciamento Integrado dos Resíduos Sólidos”. IBAM, Rio de Janeiro, Brasil.

Júnior, J. A. C., Teixeira, P. L., (2003). “Emissões em Processos de Combustão “. 1ª Edição. UNESP, São Paulo, Brasil. pp. 21 - 128.

Levy, J., Teles, M., Madeira, L., Pinela, A., (2002), “O Mercado dos Resíduos em Portugal”. 1ª Edição. Associação das Empesas Portuguesas para o Sector do Ambiente (AEPESA). Lisboa, Portugal. pp.10.

Machado, L. L., (2004). “Controle de Processos Distribuídos na Presença de Tempo Morto”. Monografia Submetida à Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil.

Manuel, F. E. R., (2007). “Resíduos”. Material de apoio às aulas teóricas de Tecnologia Ambiental e Segurança. Licenciatura em Engenharia Química e Biológica. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.

Martins, L., (2011). “Indústrias Químicas Inorgânicas”. Material de apoio às aulas teóricas de Processos Industriais. Mestrado em Engenharia Química e Biológica. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.

Mata, P., Coutinho, M., (2003). “Monitorização Ambiental de uma Unidade de Incineração de Resíduos”. Instituto do Ambiente e Desenvolvimento. Campus Universitário do Aveiro, Aveiro.

Matsuda, H., Ozawa, S., Naruse, K., Ito, K., Kojima, Y., Yanase, T. H., (2004). “*Kinetics of HCl emission from inorganic chlorides in simulated municipal wastes incineration conditions*”. *Chemical Engineering Science*, (60): 545 – 552.

May, W. R., (2012). “*Reduction of Thermal and Prompt NOx In Exhausts of Natural Gas Fueled Boilers*”. *SFA International, Inc, Houston. TX 77041-6038*.

Olie, K., Vermeulen, P., Hutzinger, O., (1977). “Chlorodibenzo-p-dionins and chlorodibenzofurans are trace components of fly ash and flue gas of some municipal incinerators in The Netherlands”. *Chemosphere*. (6): 455-459.

Omari, A., Said, M., Njau, K., John, G., Mtui, P., (2014). “*Energy Recovery routes from Municipal Solid Waste, A case study of Arusha-Tanzania*”. *Journal of Energy Technologies and Policy*. ISSN 2224-3232 (Paper), Vol.4, No.5.

Pássaro, A. D., Correia, M. L. S., Martins, C., (2002). “*Resíduos Sólidos Urbanos, Conceção, Construção e Exploração da Tecossistemas*”. 1ª Edição, INR-Instituto Nacional dos Resíduos. pp.223-234.

Pinheiro, C. C. P., Valle, M. R., (1995). “Controle de combustão: Optimização do excesso de ar”. Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG. Belo Horizonte, Brasil.

Pradhan, P. K., Mohanty, C. R., 2, Swar, A. K., Mohapatra, P., (2012). “*Urban Solid Waste Management of Guwahati City in North-East India*”. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, n.2, (6): 67-73.

Quina, J. M. M., (2005). “Processo de Inertização e Valorização de Cinzas Volantes-Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos”. Tese de Doutorado em Engenharia Química. Universidade de Coimbra. Coimbra.

Rand, T., Houkohl, J., Marxen, U., (2000). "*Municipal Solid Waste Incineration*". *A Decision Maker's Guide; The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, Washington, D.C., U.S.A.*

Reis, F. M., Miguel, P. J., Sampaio, C., Aguiar, P., Melim, M. J., Pöpke O., (2007). "*Determinants of dioxins and furans in blood of non-occupationally exposed populations living near Portuguese solid waste incinerators*". *Chemosphere* (67): S224-S230. Portugal

Reis, J. F. R., (2009). "Eliminação de Dioxinas Em Cinzas Volantes com Nanopartículas de Ferro". Tese de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Rigato, P., (2008). "Estudo da composição de alimentação de um incinerador rotativo de resíduos visando aumento da capacidade operacional". Tese de Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, Brasil.

Rogaume, T., Jabouille, F., Torero, J. L., (2008). "*Effect of excess air on grate combustion of solid wastes and on gaseous products*". *International Journal of Thermal Science*, (48): 165 – 173.

Russo, M. A. T., (2003). "Tratamento de Resíduos Sólidos". Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra, Coimbra.

Seborg, E. D., Edgar, F. T., Mellichamp, A. D., (2004). "*Process Dynamics and Control*". *Second Edition*. John Wiley & Sons, Inc. pp 163.

Stubenvoll, J., Böhmer, S., Szednyj, I., (2002). "*State of the art for waste incineration plants*". *Federal Ministry of Agriculture and Forestry, Environment and Water Management, Division VI/3, Stubenbastei 5, 1010 Wien. Vienna.*

Tchobanoglous, G., Kreith, F., (2002). "*Handbook of Solid Waste Management*". 2ª Edição. *McGraw-Hill Handbooks. New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto.* Capítulo 13A, pp. 13.7.

Ting, H., Chen, H., Yen, C., (2007) "*A PID ratio control for removal of HCl/SOX in flue gas from refuse municipal incinerators*". *Control Engineering Practice* (16): 286–293. Taiwan.

Valorsul, (2013a). "Relatório Ambiental Anual relativo à exploração da CTRSU; Relatório- ano 2012, Lisboa.

Valorsul, (2013b). "Monitorização em descontínuo das emissões atmosféricas da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos – Metais Pesados, Dioxinas e Furanos – relatório-1ª Amostragem 2013". Direcção de Estudos, Qualidade e Inovação; Direcção de Valorização Energética. Valorsul, Lisboa.

Viegas, S., (2012). "Caracterização e Quantificação de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e Resíduos de Construção e Demolição (RCD)". Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Escola Superior de Biotecnologia. Universidade Católica Portuguesa, Lisboa.

Wey, M. Y., Chen, J. C., Wu, H. Y., Yu, W. J., Tsai, T., (2005). "*Formations and controls of HCl and PAHs by different additives during waste incineration*". *Fuel*, (85): 755 – 763.

Wey, M. Y., Liu, K. Y., Yu, W. J., Lin, C. L., Chang, F. Y., (2007). "*Influences of chlorine content on emission of HCl and organic compounds in waste incineration using fluidized beds*". *Waste Management*, (28): 406 - 415.

WHO - World Health Organization (2013). "*Health effects of particulate matter. Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia*". WHO Regional Office for Europe. ISBN 978 92 890 0001 7.

Xiao-dong, L., Ji, Z., Jim-hua, Y., Ke-fa, C., Shawn, P. R., Brian, K. G., Chunwai, L., (2006). "Experimental and modeling study of de novo formation of PCDDPCDF on MSW fly ash". *Journal of Environmental Sciences*, (19): 117-122.

Zandaryaa, S., Buekens, A. "Pollution Control Technologies" –, *Control of Sulfur Oxides. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Vol II.

### **Legislação e Normas**

Decreto -Lei n.º 127/2013 de 30 de Agosto. Diário da República, 1ª série, N.º 167. Emissões Industriais. Lisboa

Decreto-Lei n.º 73/2011 de 17 de Junho. Diário da República, 1ª série, N.º 116. Regime de Gestão de Resíduos. Lisboa.

Decreto-Lei nº 78/2004 de 3 de Abril. Diário da República, 1ª série A, N.º 80. Regime da prevenção e controlo das emissões de poluentes para a atmosfera. Lisboa.

Portaria n.º 187 – A/2014 de 17 de Setembro de 2014. Diário da República, 1ª série, N.º 179. Aprova o Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos (PERSU 2020), para Portugal Continental. Lisboa

Portaria n.º 209/2004 de 3 de Março. Diário da República, 1ª série B, N.º 53. Lista Europeia de Resíduos. Lisboa.

Portaria n.º 851/2009 de 7 de Agosto. Diário da República, 1ª série, N.º 152. Caracterização dos Resíduos Urbanos. Lisboa.

### **Cibergrafia**

ABB, (2014). ABB. [www.abb.pt/http://www.abb.pt/product/seitp330/34797fa61cc7792bc12576ff005d3d16.aspx?productLanguage=pt&country=PT](http://www.abb.pt/product/seitp330/34797fa61cc7792bc12576ff005d3d16.aspx?productLanguage=pt&country=PT). Acedido em Setembro de 2014.

Analytics Ltd., (2014). Analytics Ltd – Analyzers and Test House. <http://www.analyticsusa.com/index.php?id=02> Acedido em Setembro de 2014.

APA, (2014). Agência Portuguesa do Ambiente. <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=943&sub3ref=944>. Acedido em Janeiro de 2014.

CCDR, (2014) - <https://www.ccdrc.pt/>; Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte. Acedido em Fevereiro de 2014.

CETESB - Companhia. Ambiental do Estado de São Paulo, (2012). "Monóxido de Carbono". Divisão de Toxicologia, Genotoxicidade e Microbiologia Ambiental. Disponível em [http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/laboratorios/fit/monoxido\\_de\\_carbono.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/laboratorios/fit/monoxido_de_carbono.pdf). Acedido em Novembro de 2014.

CEWEP - *Confederation of European Waste-to-Energy Plants*, (2014). [http://www.cewep.eu/information/data/graphs/m\\_1217](http://www.cewep.eu/information/data/graphs/m_1217). Acedido em Setembro de 2014.

CITIDEP - Centro de Investigação de Tecnologia de Informação para uma Democracia Participativa, (2014). "Questões sobre o Estudo de Impacte Ambiental-EIA da CTRSU de S. João da Talha". <http://www.citidep.pt/ims/EIA/F2.html>. Acedido em Novembro de 2014.

Delta Way Energy, (2014). "Waste and Biomass Power Plant Design and Operation". Disponível em [www.deltawayenergy.com](http://www.deltawayenergy.com). Acedido em Fevereiro de 2014.

EGF - Empresa Geral do Fomento, S.A, (2014). <http://www.egf.pt/>. Acedido em Agosto de 2014.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética, (2008). “Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS”. Ministério de Minas e Energia; Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em [http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20081208\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20081208_1.pdf). Acedido em Maio de 2014.

ERSAR – Entidade Reguladora de Serviços de Água e Resíduos, (2014). <http://www.ersar.pt/website/ViewContent.aspx?FolderPath=%5CRoot%5CContents%5CSitio%5CMenuPrincipal%5CSector&Section=MenuPrincipal&SubFolderPath=>. Acedido em Setembro de 2014.

ERSUC - Resíduos Sólidos do Centro, S.A., (2014). <http://ersuc.pt/www/index.php/componentes/componente-contacto/unidade-de-tmb>. Acedido em Agosto de 2014.

Eurostat, (2014). <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=tsdpc240&plugin=1>. Acedido em Agosto de 2014.

FLSmidth, (2014). <http://www.flsmidth.com/en-US/Gas+Analysis+Technology/Products/Dust+Meters/Durag+D-R+300-40>. Acedido em Setembro de 2014).

GEA Niro, (2014). “GEA Niro Spray Drying Absorption”. GEA Process Engineering A/S. Disponível em [http://www.niro.com/niro/cmsresources.nsf/filenames/spray-drying-absorption.pdf/\\$file/spray-drying-absorption.pdf](http://www.niro.com/niro/cmsresources.nsf/filenames/spray-drying-absorption.pdf/$file/spray-drying-absorption.pdf). Acedido em Novembro de 2014.

INE - Instituto Nacional de Estatística de Cabo Verde, (2014). <http://www.ine.cv/dadostats/dados.aspx?d=1>. Acedido em Dezembro de 2014.

Lipor - Serviço de Gestão de Resíduos do Grande Porto, (2014). [www.lipor.pt](http://www.lipor.pt). Acedido em Novembro de 2013).

Palma, I., (2014). “Sistemas de Gestão de RU”. Naturlink. Disponível em <http://naturlink.sapo.pt/Natureza-e-Ambiente/Gestao-Ambiental/content/Sistemas-de-gestao-de-residuos-urbanos?viewall=true&print=true>. Acedido em Agosto de 2014.

Valor Ambiente - Gestão e Administração de Resíduos de Madeira, S.A., (2014). [www.valorambiente.pt](http://www.valorambiente.pt). Acedido em Novembro de 2013.

Valorsul - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos das Regiões de Lisboa e do Oeste, S.A, (2014). [www.valorsul.pt](http://www.valorsul.pt). Acedido de Novembro de 2013 a Outubro de 2014. Documentos consultados:

- “Relatório e Contas. Caderno de Sustentabilidade 2009, 2010, 2011, 2012 e 2013”. Valorsul, Lisboa;
- “Monitorização em contínuo das emissões atmosféricas da Central de Tratamento dos Resíduos Sólidos Urbanos – Relatório-4º trimestre de 2013”. Direcção de Estudos, Qualidade e Inovação; Direcção de Valorização Energética, Valorsul, Lisboa;
- “Valorsul, 20 Anos a Cuidar do Ambiente”. Valorsul, Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos das Regiões de Lisboa e do Oeste, SA., Plataforma Ribeirinha da CP, Estação de Mercadorias da Bobadela, São João da Talha, Lisboa.



## Anexos

### Anexo 1: Lista Europeia dos Resíduos (LER)

O anexo corresponde apenas à lista dos RSU, os únicos abordados neste trabalho, de acordo com a Portaria n.º 209/2009, de 3 de Março. A Ler também encontra disponibilizada na página de ERSUC – Resíduos Sólidos do Centro S.A, em: <http://ersuc.pt/www/dados/ler.pdf>.

Os capítulos têm 2 dígitos (e estão identificados a azul)

Os subcapítulos têm 4 dígitos (e estão identificados a cor-de-laranja) Os códigos LER têm 6 dígitos e são estes que devem ser usados. Os resíduos perigosos são identificados com o símbolo (\*)

**Tabela 15:** Lista Europeia dos Resíduos (LER)

**20-Resíduos urbanos e equiparados (resíduos domésticos, do comércio, indústrias e serviços), incluindo as fracções recolhidas selectivamente:**

**20-01- Fracções recolhidas selectivamente (excepto 15-01):**

20 01 01 Papel e cartão. 20 01 02 Vidro.

20 01 08 Resíduos biodegradáveis de cozinhas e cantinas.

20 01 10 Roupas.

20 01 11 Têxteis.

20 01 13 (\*) Solventes.

20 01 14 (\*) Ácidos.

20 01 15 (\*) Resíduos alcalinos.

20 01 17 (\*) Produtos químicos para fotografia.

20 01 19 (\*) Pesticidas.

20 01 21 (\*) Lâmpadas fluorescentes e outros resíduos contendo mercúrio.

20 01 23 (\*) Equipamento fora de uso contendo clorofluorcarbonetos.

20 01 25 Óleos e gorduras alimentares.

20 01 26 (\*) Óleos e gorduras não abrangidos em 20 01 25.

20 01 27 (\*) Tintas, produtos adesivos, colas e resinas contendo substâncias perigosas.

20 01 28 Tintas, produtos adesivos, colas e resinas não abrangidos em 20 01 27.

20 01 29 (\*) Detergentes contendo substâncias perigosas.

20 01 30 Detergentes não abrangidos em 20 01 29.

20 01 31 (\*) Medicamentos citotóxicos e citostáticos.

20 01 32 Medicamentos não abrangidos em 20 01 31.

20 01 33 (\*) Pilhas e acumuladores abrangidos em 16 06 01, 16 06 02 ou 16 06 03 e pilhas e acumuladores não triados contendo essas pilhas ou acumuladores.

20 01 34 Pilhas e acumuladores não abrangidos em 20 01 33.

20 01 35 (\*) Equipamento eléctrico e electrónico fora de uso não abrangido em 20 01 21 ou 20 01 23 contendo componentes perigosos (2).

20 01 36 Equipamento eléctrico e electrónico fora de uso não abrangido em 20 01 21, 20 01 23 ou 20 01 35.

20 01 37 (\*) Madeira contendo substâncias perigosas.

20 01 38 Madeira não abrangida em 20 01 37.

20 01 39 Plásticos.

20 01 40 Metais.

20 01 41 Resíduos da limpeza de chaminés.

20 01 99 Outras fracções não anteriormente especificadas.

#### **20 02 Resíduos de jardins (incluindo cemitérios):**

20 02 01 Resíduos biodegradáveis.

20 02 02 Terras e pedras.

20 02 03 Outros resíduos não biodegradáveis.

#### **20 03 Outros resíduos urbanos e equiparados:**

20 03 01 Outros resíduos urbanos e equiparados, incluindo misturas de resíduos.

20 03 02 Resíduos de mercados.

20 03 03 Resíduos da limpeza de ruas.

20 03 04 Lamas de fossas sépticas.

20 03 06 Resíduos da limpeza de esgotos.

20 03 07 Monstros.

20 03 99 Resíduos urbanos e equiparados não anteriormente especificados.

**Anexo 2: Resultados experimentais do sistema de controlo, em malha aberta, de emissão do NOx e caudal de amónia relativo ao aumento de 25% na abertura da válvula.**

**Tabela 16:** Resultados experimentais do sistema de controlo, em malha aberta, de emissão do NOx e caudal de amónia.

Tempo do ensaio (segundos)	Concentração do NOx (mg/Nm <sup>3</sup> )	Caudal de amónia (kg/h)	Varição da abertura da Válvula (%)
14:44:20	248,9	34,6	15,0
14:44:21	248,8	34,7	40,0
14:44:22	248,8	34,7	40,0
14:44:23	248,8	34,8	40,0
14:44:24	248,9	37,0	40,0
14:44:25	248,8	43,0	40,0
14:44:26	248,8	48,6	40,0
14:44:27	248,9	54,0	40,0
14:44:28	248,9	57,6	40,0
14:44:29	248,9	60,2	40,0
14:44:30	248,8	62,1	40,0
14:44:31	248,8	63,1	40,0
14:44:32	248,9	64,0	40,0
14:44:33	248,9	64,7	40,0
14:44:34	248,8	65,1	40,0
14:44:35	248,9	65,4	40,0
14:44:36	248,8	65,5	40,0
14:44:37	248,8	65,6	40,0
14:44:38	248,8	65,7	40,0
14:44:39	248,8	65,7	40,0
14:44:40	248,8	65,8	40,0
14:44:41	248,9	65,9	40,0
14:44:42	248,9	66,0	40,0
14:44:43	248,9	66,1	40,0
14:44:44	248,9	66,3	40,0
14:44:45	248,8	66,5	40,0
14:44:46	248,8	66,8	40,0
14:44:47	248,8	67,0	40,0
14:44:48	248,8	67,2	40,0
14:44:49	248,9	67,5	40,0
14:44:50	248,9	67,7	40,0
14:44:51	248,9	67,9	40,0
14:44:52	248,8	68,1	40,0
14:44:53	248,6	68,3	40,0
14:44:54	247,5	68,4	40,0
14:44:55	247,4	68,6	40,0
14:44:56	247,4	68,7	40,0
14:44:57	247,4	68,8	40,0
14:44:58	247,4	68,8	40,0
14:44:59	247,5	68,8	40,0
14:45:00	247,5	68,8	40,0
14:45:01	247,4	68,7	40,0
14:45:02	247,4	68,6	40,0
14:45:03	247,4	68,6	40,0

14:45:04	247,5	68,5	40,0
14:45:05	247,5	68,5	40,0
14:45:06	247,4	68,5	40,0
14:45:07	247,5	68,5	40,0
14:45:08	247,4	68,6	40,0
14:45:09	247,4	68,7	40,0
14:45:10	247,5	68,8	40,0
14:45:11	247,5	68,9	40,0
14:45:12	247,4	69,0	40,0
14:45:13	247,4	69,1	40,0
14:45:14	247,5	69,2	40,0
14:45:15	247,4	69,4	40,0
14:45:16	247,4	69,5	40,0
14:45:17	247,4	69,6	40,0
14:45:18	247,5	69,7	40,0
14:45:19	247,5	69,8	40,0
14:45:20	247,5	70,0	40,0
14:45:21	247,4	70,0	40,0
14:45:22	247,4	70,1	40,0
14:45:23	247,4	70,2	40,0
14:45:24	247,4	70,3	40,0
14:45:25	247,4	70,3	40,0
14:45:26	247,4	70,3	40,0
14:45:27	247,4	70,2	40,0
14:45:28	247,5	70,1	40,0
14:45:29	247,5	70,0	40,0
14:45:30	247,4	69,9	40,0
14:45:31	244,6	69,9	40,0
14:45:32	244,4	69,8	40,0
14:45:33	244,4	69,8	40,0
14:45:34	244,4	69,8	40,0
14:45:35	244,4	69,8	40,0
14:45:36	244,4	69,8	40,0
14:45:37	244,4	69,8	40,0
14:45:38	244,4	69,9	40,0
14:45:39	244,4	69,9	40,0
14:45:40	244,4	70,0	40,0
14:45:41	244,4	70,0	40,0
14:45:42	244,4	70,1	40,0
14:45:43	244,4	70,2	40,0
14:45:44	244,4	70,3	40,0
14:45:45	244,4	70,4	40,0
14:45:46	244,4	70,4	40,0
14:45:47	244,4	70,5	40,0
14:45:48	244,4	70,6	40,0
14:45:49	244,4	70,7	40,0
14:45:50	244,4	70,8	40,0
14:45:51	244,4	70,8	40,0
14:45:52	244,4	70,8	40,0
14:45:53	244,4	70,8	40,0
14:45:54	244,4	70,7	40,0

14:45:55	244,4	70,6	40,0
14:45:56	244,4	70,5	40,0
14:45:57	244,4	70,4	40,0
14:45:58	244,4	70,3	40,0
14:45:59	244,4	70,2	40,0
14:46:00	244,4	70,1	40,0
14:46:01	244,4	70,1	40,0
14:46:02	244,4	70,1	40,0
14:46:03	244,4	70,1	40,0
14:46:04	244,4	70,1	40,0
14:46:05	244,4	70,1	40,0
14:46:06	244,4	70,2	40,0
14:46:07	244,4	70,3	40,0
14:46:08	244,4	70,3	40,0
14:46:09	237,9	70,4	40,0
14:46:10	238,7	70,5	40,0
14:46:11	238,7	70,6	40,0
14:46:12	238,8	70,6	40,0
14:46:13	238,8	70,7	40,0
14:46:14	238,7	70,8	40,0
14:46:15	238,7	70,8	40,0
14:46:16	238,7	70,9	40,0
14:46:17	238,7	70,9	40,0
14:46:18	238,8	70,9	40,0
14:46:19	238,8	70,9	40,0
14:46:20	238,7	70,8	40,0
14:46:21	238,8	70,8	40,0
14:46:22	238,7	70,7	40,0
14:46:23	238,8	70,6	40,0
14:46:24	238,7	70,5	40,0
14:46:25	238,7	70,4	40,0
14:46:26	238,8	70,3	40,0
14:46:27	238,8	70,2	40,0
14:46:28	238,8	70,2	40,0
14:46:29	238,7	70,2	40,0
14:46:30	238,8	70,2	40,0
14:46:31	238,8	70,2	40,0
14:46:32	238,7	70,2	40,0
14:46:33	238,7	70,3	40,0
14:46:34	238,8	70,4	40,0
14:46:35	238,7	70,5	40,0
14:46:36	238,7	70,6	40,0
14:46:37	238,8	70,6	40,0
14:46:38	238,7	70,7	40,0
14:46:39	238,8	70,8	40,0
14:46:40	238,8	70,8	40,0
14:46:41	238,8	70,9	40,0
14:46:42	238,7	71,0	40,0
14:46:43	238,8	71,1	40,0
14:46:44	238,8	71,1	40,0
14:46:45	238,7	71,1	40,0
14:46:46	238,7	71,1	40,0

14:46:47	226,0	71,0	40,0
14:46:48	226,7	70,9	40,0
14:46:49	226,7	70,8	40,0
14:46:50	226,7	70,7	40,0
14:46:51	226,7	70,6	40,0
14:46:52	226,7	70,5	40,0
14:46:53	226,7	70,4	40,0
14:46:54	226,7	70,3	40,0
14:46:55	226,7	70,3	40,0
14:46:56	226,7	70,2	40,0
14:46:57	226,7	70,2	40,0
14:46:58	226,7	70,3	40,0
14:46:59	226,7	70,3	40,0
14:47:00	226,7	70,3	40,0
14:47:01	226,8	70,4	40,0
14:47:02	226,7	70,5	40,0
14:47:03	226,7	70,5	40,0
14:47:04	226,7	70,6	40,0
14:47:05	226,7	70,7	40,0
14:47:06	226,7	70,8	40,0
14:47:07	226,7	70,8	40,0
14:47:08	226,7	70,9	40,0
14:47:09	226,7	70,9	40,0
14:47:10	226,7	71,0	40,0
14:47:11	226,7	71,1	40,0
14:47:12	226,7	71,1	40,0
14:47:13	226,8	71,1	40,0
14:47:14	226,7	71,0	40,0
14:47:15	226,7	70,9	40,0
14:47:16	226,7	70,8	40,0
14:47:17	226,7	70,7	40,0
14:47:18	226,7	70,6	40,0
14:47:19	226,7	70,4	40,0
14:47:20	226,7	70,3	40,0
14:47:21	226,7	70,3	40,0
14:47:22	226,7	70,2	40,0
14:47:23	226,7	70,2	40,0
14:47:24	226,7	70,2	40,0
14:47:25	210,3	70,2	40,0
14:47:26	210,6	70,2	40,0
14:47:27	210,7	70,3	40,0
14:47:28	210,6	70,3	40,0
14:47:29	210,7	70,4	40,0
14:47:30	210,7	70,5	40,0
14:47:31	210,6	70,5	40,0
14:47:32	210,6	70,6	40,0
14:47:33	210,7	70,7	40,0
14:47:34	210,6	70,7	40,0
14:47:35	210,6	70,8	40,0
14:47:36	210,7	70,9	40,0
14:47:37	210,7	71,0	40,0
14:47:38	210,6	71,0	40,0

14:47:39	210,6	71,0	40,0
14:47:40	210,6	71,0	40,0
14:47:41	210,6	71,0	40,0
14:47:42	210,6	70,9	40,0
14:47:43	210,6	70,8	40,0
14:47:44	210,6	70,7	40,0
14:47:45	210,6	70,5	40,0
14:47:46	210,6	70,3	40,0
14:47:47	210,6	70,3	40,0
14:47:48	210,7	70,2	40,0
14:47:49	210,6	70,1	40,0
14:47:50	210,6	70,1	40,0
14:47:51	210,6	70,1	40,0
14:47:52	210,6	70,1	40,0
14:47:53	210,7	70,1	40,0
14:47:54	210,6	70,1	40,0
14:47:55	210,6	70,2	40,0
14:47:56	210,6	70,3	40,0
14:47:57	210,7	70,3	40,0
14:47:58	210,6	70,4	40,0
14:47:59	210,6	70,5	40,0
14:48:00	210,6	70,6	40,0
14:48:01	210,6	70,6	40,0
14:48:02	210,6	70,7	40,0
14:48:03	189,6	70,8	40,0
14:48:04	189,4	70,9	40,0
14:48:05	189,4	70,9	40,0
14:48:06	189,4	71,0	40,0
14:48:07	189,4	71,0	40,0
14:48:08	189,4	70,9	40,0
14:48:09	189,4	70,8	40,0
14:48:10	189,4	70,7	40,0
14:48:11	189,4	70,6	40,0
14:48:12	189,4	70,4	40,0
14:48:13	189,4	70,3	40,0
14:48:14	189,4	70,2	40,0
14:48:15	189,4	70,1	40,0
14:48:16	189,4	70,0	40,0
14:48:17	189,4	70,0	40,0
14:48:18	189,4	70,0	40,0
14:48:19	189,4	70,0	40,0
14:48:20	189,4	70,0	40,0
14:48:21	189,4	70,0	40,0
14:48:22	189,4	70,1	40,0
14:48:23	189,4	70,1	40,0
14:48:24	189,4	70,2	40,0
14:48:25	189,4	70,3	40,0
14:48:26	189,4	70,4	40,0
14:48:27	189,4	70,4	40,0
14:48:28	189,4	70,5	40,0
14:48:29	189,4	70,6	40,0
14:48:30	189,4	70,6	40,0

14:48:31	189,4	70,7	40,0
14:48:32	189,4	70,8	40,0
14:48:33	189,4	70,8	40,0
14:48:34	189,4	70,8	40,0
14:48:35	189,4	70,8	40,0
14:48:36	189,4	70,7	40,0
14:48:37	189,4	70,5	40,0
14:48:38	189,4	70,4	40,0
14:48:39	189,4	70,2	40,0
14:48:40	188,1	70,0	40,0
14:48:41	176,8	69,9	40,0
14:48:42	176,7	69,8	40,0
14:48:43	176,7	69,7	40,0
14:48:44	176,8	69,7	40,0
14:48:45	176,7	69,6	40,0
14:48:46	176,7	69,6	40,0
14:48:47	176,8	69,6	40,0
14:48:48	176,8	69,6	40,0
14:48:49	176,7	69,7	40,0
14:48:50	176,7	69,7	40,0
14:48:51	176,8	69,7	40,0
14:48:52	176,7	69,8	40,0
14:48:53	176,7	69,8	40,0
14:48:54	176,7	69,9	40,0
14:48:55	176,7	70,0	40,0
14:48:56	176,7	70,1	40,0
14:48:57	176,8	70,2	40,0
14:48:58	176,7	70,2	40,0
14:48:59	176,7	70,3	40,0
14:49:00	176,7	70,4	40,0
14:49:01	176,7	70,4	40,0
14:49:02	176,7	70,4	40,0
14:49:03	176,8	70,3	40,0
14:49:04	176,7	70,2	40,0
14:49:05	176,8	70,1	40,0
14:49:06	176,7	70,0	40,0
14:49:07	176,7	69,8	40,0
14:49:08	176,7	69,7	40,0
14:49:09	176,7	69,7	40,0
14:49:10	176,8	69,6	40,0
14:49:11	176,7	69,6	40,0
14:49:12	176,7	69,6	40,0
14:49:13	176,7	69,6	40,0
14:49:14	176,8	69,6	40,0
14:49:15	176,8	69,6	40,0
14:49:16	176,7	69,7	40,0
14:49:17	176,7	69,7	40,0
14:49:18	175,7	69,8	40,0
14:49:19	171,3	69,9	40,0
14:49:20	171,3	70,0	40,0
14:49:21	171,3	70,1	40,0
14:49:22	171,3	70,2	40,0

14:49:23	171,3	70,2	40,0
14:49:24	171,3	70,3	40,0
14:49:25	171,3	70,4	40,0
14:49:26	171,3	70,5	40,0
14:49:27	171,3	70,6	40,0
14:49:28	171,3	70,6	40,0
14:49:29	171,3	70,5	40,0
14:49:30	171,3	70,5	40,0
14:49:31	171,3	70,4	40,0
14:49:32	171,3	70,2	40,0
14:49:33	171,3	70,1	40,0
14:49:34	171,3	70,0	40,0
14:49:35	171,3	69,8	40,0
14:49:36	171,3	69,8	40,0
14:49:37	171,3	69,7	40,0
14:49:38	171,3	69,7	40,0
14:49:39	171,3	69,6	40,0
14:49:40	171,3	69,6	40,0
14:49:41	171,3	69,6	40,0
14:49:42	171,3	69,7	40,0
14:49:43	171,3	69,7	40,0
14:49:44	171,3	69,7	40,0
14:49:45	171,3	69,8	40,0
14:49:46	171,3	69,8	40,0
14:49:47	171,3	69,9	40,0
14:49:48	171,3	70,0	40,0
14:49:49	171,3	70,1	40,0
14:49:50	171,3	70,1	40,0
14:49:51	171,3	70,2	40,0
14:49:52	171,3	70,3	40,0
14:49:53	171,3	70,3	40,0
14:49:54	171,2	70,4	40,0
14:49:55	171,3	70,3	40,0
14:49:56	168,1	70,3	40,0
14:49:57	170,6	70,2	40,0
14:49:58	170,6	70,1	40,0
14:49:59	170,6	70,0	40,0
14:50:00	170,6	69,8	40,0
14:50:01	170,6	69,7	40,0
14:50:02	170,6	69,6	40,0
14:50:03	170,6	69,5	40,0
14:50:04	170,6	69,5	40,0
14:50:05	170,6	69,4	40,0
14:50:06	170,6	69,4	40,0
14:50:07	170,6	69,4	40,0
14:50:08	170,6	69,4	40,0
14:50:09	170,6	69,5	40,0
14:50:10	170,6	69,5	40,0
14:50:11	170,6	69,6	40,0
14:50:12	170,6	69,7	40,0
14:50:13	170,6	69,8	40,0
14:50:14	170,6	69,8	40,0

14:50:15	170,6	69,9	40,0
14:50:16	170,6	70,0	40,0
14:50:17	170,6	70,1	40,0
14:50:18	170,6	70,2	40,0
14:50:19	170,6	70,2	40,0
14:50:20	170,6	70,3	40,0
14:50:21	170,6	70,3	40,0
14:50:22	170,6	70,3	40,0
14:50:23	170,5	70,3	40,0
14:50:24	170,6	70,2	40,0
14:50:25	170,6	70,1	40,0
14:50:26	170,6	69,9	40,0
14:50:27	170,6	69,8	40,0
14:50:28	170,6	69,7	40,0
14:50:29	170,6	69,6	40,0
14:50:30	170,6	69,5	40,0
14:50:31	170,6	69,5	40,0
14:50:32	170,6	69,5	40,0
14:50:33	170,6	69,5	40,0
14:50:34	162,4	69,6	40,0
14:50:35	165,2	69,6	40,0
14:50:36	165,2	69,6	40,0
14:50:37	165,2	69,7	40,0
14:50:38	165,2	69,7	40,0
14:50:39	165,2	69,8	40,0
14:50:40	165,2	69,9	40,0
14:50:41	165,2	70,0	40,0
14:50:42	165,2	70,1	40,0
14:50:43	165,2	70,2	40,0
14:50:44	165,2	70,3	40,0
14:50:45	165,2	70,4	40,0
14:50:46	165,2	70,5	40,0
14:50:47	165,2	70,6	40,0
14:50:48	165,2	70,6	40,0
14:50:49	165,2	70,6	40,0
14:50:50	165,2	70,6	40,0
14:50:51	165,2	70,5	40,0
14:50:52	165,2	70,3	40,0
14:50:53	165,2	70,2	40,0
14:50:54	165,2	70,0	40,0
14:50:55	165,2	69,9	40,0
14:50:56	165,2	69,9	40,0
14:50:57	165,2	69,8	40,0
14:50:58	165,2	69,8	40,0
14:50:59	165,2	69,8	40,0
14:51:00	165,2	69,8	40,0
14:51:01	165,2	69,9	40,0
14:51:02	165,2	69,9	40,0
14:51:03	165,2	69,9	40,0
14:51:04	165,2	70,0	40,0
14:51:05	165,2	70,1	40,0
14:51:06	165,2	70,1	40,0

14:51:07	165,2	70,2	40,0
14:51:08	165,2	70,3	40,0
14:51:09	165,2	70,4	40,0
14:51:10	165,2	70,5	40,0
14:51:11	165,2	70,6	40,0
14:51:12	158,3	70,6	40,0
14:51:13	158,1	70,7	40,0
14:51:14	158,1	70,7	40,0
14:51:15	158,1	70,7	40,0
14:51:16	158,1	70,6	40,0
14:51:17	158,1	70,5	40,0
14:51:18	158,1	70,4	40,0
14:51:19	158,1	70,2	40,0
14:51:20	158,1	70,1	40,0
14:51:21	158,1	70,0	40,0
14:51:22	158,1	70,0	40,0
14:51:23	158,1	69,9	40,0
14:51:24	158,1	69,9	40,0
14:51:25	158,1	69,9	40,0
14:51:26	158,1	69,9	40,0
14:51:27	158,1	69,9	40,0
14:51:28	158,1	69,9	40,0
14:51:29	158,1	70,0	40,0
14:51:30	158,1	70,0	40,0
14:51:31	158,1	70,1	40,0
14:51:32	158,1	70,2	40,0
14:51:33	158,1	70,2	40,0
14:51:34	158,1	70,3	40,0
14:51:35	158,1	70,4	40,0
14:51:36	158,1	70,5	40,0
14:51:37	158,1	70,5	40,0
14:51:38	158,1	70,6	40,0
14:51:39	158,1	70,7	40,0
14:51:40	158,1	70,7	40,0
14:51:41	158,1	70,7	40,0
14:51:42	158,1	70,7	40,0
14:51:43	158,1	70,6	40,0
14:51:44	158,1	70,5	40,0
14:51:45	158,1	70,4	40,0
14:51:46	158,1	70,2	40,0
14:51:47	158,1	70,1	40,0
14:51:48	158,1	70,0	40,0
14:51:49	158,1	69,9	40,0
14:51:50	155,9	69,9	40,0
14:51:51	155,8	69,9	40,0
14:51:52	155,8	69,9	40,0
14:51:53	155,8	69,9	40,0
14:51:54	155,7	70,0	40,0
14:51:55	155,7	70,0	40,0
14:51:56	155,7	70,1	40,0
14:51:57	155,8	70,1	40,0
14:51:58	155,8	70,2	40,0

14:51:59	155,8	70,3	40,0
14:52:00	155,7	70,4	40,0
14:52:01	155,8	70,5	40,0
14:52:02	155,8	70,6	40,0
14:52:03	155,7	70,7	40,0
14:52:04	155,8	70,7	40,0
14:52:05	155,8	70,8	40,0
14:52:06	155,8	70,9	40,0
14:52:07	155,7	70,9	40,0
14:52:08	155,7	70,8	40,0
14:52:09	155,7	70,8	40,0
14:52:10	155,8	70,7	40,0
14:52:11	155,8	70,5	40,0
14:52:12	155,8	70,4	40,0
14:52:13	155,8	70,2	40,0
14:52:14	155,8	70,1	40,0
14:52:15	155,8	70,0	40,0
14:52:16	155,8	69,9	40,0
14:52:17	155,7	69,8	40,0
14:52:18	155,8	69,7	40,0
14:52:19	155,7	69,7	40,0
14:52:20	155,8	69,7	40,0
14:52:21	155,8	69,8	40,0
14:52:22	155,8	69,8	40,0
14:52:23	155,7	69,9	40,0
14:52:24	155,8	70,0	40,0
14:52:25	155,8	70,0	40,0
14:52:26	155,7	70,1	40,0
14:52:27	155,6	70,2	40,0
14:52:28	159,2	70,3	40,0
14:52:29	159,3	70,3	40,0
14:52:30	159,3	70,4	40,0
14:52:31	159,3	70,5	40,0
14:52:32	159,2	70,5	40,0
14:52:33	159,3	70,5	40,0
14:52:34	159,2	70,5	40,0
14:52:35	159,2	70,4	40,0
14:52:36	159,2	70,3	40,0
14:52:37	159,3	70,2	40,0
14:52:38	159,3	70,1	40,0
14:52:39	159,3	70,0	40,0
14:52:40	159,3	69,8	40,0
14:52:41	159,3	69,8	40,0
14:52:42	159,3	69,7	40,0
14:52:43	159,2	69,7	40,0
14:52:44	159,3	69,7	40,0
14:52:45	159,2	69,7	40,0
14:52:46	159,3	69,8	40,0
14:52:47	159,3	69,8	40,0
14:52:48	159,3	69,9	40,0
14:52:49	159,2	70,0	40,0
14:52:50	159,3	70,1	40,0

14:52:51	159,2	70,2	40,0
14:52:52	159,2	70,3	40,0
14:52:53	159,2	70,4	40,0
14:52:54	159,2	70,5	40,0
14:52:55	159,3	70,6	40,0
14:52:56	159,3	70,6	40,0
14:52:57	159,3	70,7	40,0
14:52:58	159,3	70,8	40,0
14:52:59	159,2	70,9	40,0
14:53:00	159,3	70,9	40,0
14:53:01	159,3	70,9	40,0
14:53:02	159,3	70,8	40,0
14:53:03	159,3	70,7	40,0
14:53:04	159,3	70,5	40,0
14:53:05	161,7	70,4	40,0
14:53:06	161,6	70,2	40,0
14:53:07	161,6	70,0	40,0
14:53:08	161,6	69,9	40,0
14:53:09	161,6	69,8	40,0
14:53:10	161,6	69,8	40,0
14:53:11	161,6	69,7	40,0
14:53:12	161,6	69,7	40,0
14:53:13	161,6	69,7	40,0
14:53:14	161,6	69,7	40,0
14:53:15	161,6	69,7	40,0
14:53:16	161,6	69,7	40,0
14:53:17	161,6	69,8	40,0
14:53:18	161,6	69,9	40,0
14:53:19	161,6	70,0	40,0
14:53:20	161,6	70,1	40,0
14:53:21	161,6	70,2	40,0
14:53:22	161,6	70,3	40,0
14:53:23	161,6	70,4	40,0
14:53:24	161,6	70,4	40,0
14:53:25	161,6	70,5	40,0
14:53:26	161,6	70,5	40,0
14:53:27	161,6	70,5	40,0
14:53:28	161,6	70,5	40,0
14:53:29	161,6	70,4	40,0
14:53:30	161,6	70,3	40,0
14:53:31	161,6	70,1	40,0
14:53:32	161,6	70,0	40,0
14:53:33	161,6	69,8	40,0
14:53:34	161,6	69,7	40,0
14:53:35	161,6	69,6	40,0
14:53:36	161,6	69,5	40,0
14:53:37	161,6	69,5	40,0
14:53:38	161,6	69,5	40,0
14:53:39	161,6	69,5	40,0
14:53:40	161,6	69,5	40,0
14:53:41	161,6	69,6	40,0
14:53:42	161,6	69,7	40,0

14:53:43	159,2	69,8	40,0
14:53:44	159,5	69,9	40,0
14:53:45	159,5	70,1	40,0
14:53:46	159,5	70,2	40,0
14:53:47	159,5	70,3	40,0
14:53:48	159,5	70,5	40,0
14:53:49	159,5	70,6	40,0
14:53:50	159,5	70,7	40,0
14:53:51	159,5	70,8	40,0
14:53:52	159,5	70,9	40,0
14:53:53	159,5	70,9	40,0
14:53:54	159,5	71,0	40,0
14:53:55	159,5	70,9	40,0
14:53:56	159,5	70,8	40,0
14:53:57	159,5	70,7	40,0
14:53:58	159,5	70,5	40,0
14:53:59	159,5	70,3	40,0
14:54:00	159,5	70,1	40,0
14:54:01	159,5	70,0	40,0
14:54:02	159,5	70,0	40,0
14:54:03	159,5	69,9	40,0
14:54:04	159,5	69,9	40,0
14:54:05	159,5	69,9	40,0
14:54:06	159,5	69,9	40,0
14:54:07	159,5	69,9	40,0
14:54:08	159,5	70,0	40,0
14:54:09	159,5	70,0	40,0
14:54:10	159,5	70,1	40,0
14:54:11	159,5	70,2	40,0
14:54:12	159,5	70,2	40,0
14:54:13	159,5	70,3	40,0
14:54:14	159,5	70,4	40,0
14:54:15	159,5	70,5	40,0
14:54:16	159,5	70,6	40,0
14:54:17	159,5	70,7	40,0
14:54:18	159,5	70,7	40,0
14:54:19	159,5	70,8	40,0
14:54:20	159,5	70,8	40,0
14:54:21	152,9	70,7	40,0
14:54:22	152,4	70,6	40,0
14:54:23	152,4	70,5	40,0
14:54:24	152,4	70,3	40,0
14:54:25	152,4	70,1	40,0
14:54:26	152,4	70,0	40,0

**Anexo 3: Determinação dos valores aproximados do caudal de amónia e concentração do NOx para a determinação dos parâmetros das funções de transferências.**

**Tabela 17:** Cálculo do caudal de NH<sub>3</sub> aproximado.

<b>Tempo (segundos)</b>	<b>Caudal de NH<sub>3</sub> aproximado (kg/h)</b>	<b>Erro<sup>2</sup></b>
0	34,70	0,00
1	34,70	0,00
2	34,70	0,01
3	37,79	0,62
4	43,96	0,93
5	48,91	0,09
6	52,87	1,28
7	56,04	2,44
8	58,58	2,63
9	60,61	2,22
10	62,24	0,74
11	63,54	0,21
12	64,59	0,01
13	65,42	0,11
14	66,09	0,48
15	66,63	1,28
16	67,06	2,13
17	67,40	2,90
18	67,68	3,92
19	67,90	4,41
20	68,08	4,74
21	68,22	4,92
22	68,33	4,98
23	68,42	4,50
24	68,49	3,98
25	68,55	3,07
26	68,60	2,56
27	68,64	2,06
28	68,67	1,36
29	68,69	0,98
30	68,71	0,66
31	68,72	0,39
32	68,74	0,19
33	68,75	0,12
34	68,75	0,02
35	68,76	0,00
36	68,77	0,00
37	68,77	0,00
38	68,77	0,00
39	68,78	0,00
40	68,78	0,01
41	68,78	0,03
42	68,78	0,03
43	68,78	0,08
44	68,78	0,08

45	68,78	0,08
46	68,78	0,08
47	68,78	0,03
48	68,79	0,01
49	68,79	0,00
50	68,79	0,01
51	68,79	0,05
52	68,79	0,10
53	68,79	0,17
54	68,79	0,38
55	68,79	0,51
56	68,79	0,66
57	68,79	0,83
58	68,79	1,03
59	68,79	1,47
60	68,79	1,47
61	68,79	1,73
62	68,79	2,00
63	68,79	2,29
64	68,79	2,29
65	68,79	2,29
66	68,79	2,00
67	68,79	1,73
68	68,79	1,47
69	68,79	1,24
70	68,79	1,24
71	68,79	1,03
72	68,79	1,03
73	68,79	1,03
74	68,79	1,03
75	68,79	1,03
Somatório do Erro <sup>2</sup>		91,47

**Tabela 18:** Cálculo da concentração do NOx aproximada

Tempo (segundos)	Concentração do NOx aproximada (mg/Nm <sup>3</sup> )	Erro <sup>2</sup>
0	248,80	0,00
1	248,80	0,00
2	248,80	0,00
3	248,80	0,01
4	248,80	0,00
5	248,80	0,00
6	248,80	0,01
7	248,80	0,01
8	248,80	0,01
9	248,80	0,00
10	248,80	0,00
11	248,80	0,01
12	248,80	0,01
13	248,80	0,00
14	248,80	0,01
15	248,80	0,00
16	248,80	0,00
17	248,80	0,00

18	248,80	0,00
19	248,80	0,00
20	248,80	0,01
21	248,80	0,01
22	248,80	0,01
23	248,80	0,01
24	248,80	0,00
25	248,80	0,00
26	248,80	0,00
27	248,80	0,00
28	248,80	0,01
29	248,80	0,01
30	248,80	0,01
31	248,80	0,00
32	248,80	0,04
33	248,80	1,69
34	248,80	1,96
35	248,80	1,96
36	248,80	1,96
37	248,80	1,96
38	248,80	1,69
39	248,80	1,69
40	248,80	1,96
41	248,80	1,96
42	248,80	1,96
43	248,80	1,69
44	248,80	1,69
45	248,80	1,96
46	248,80	1,69
47	248,80	1,96
48	248,80	1,96
49	248,80	1,69
50	248,80	1,69
51	248,80	1,96
52	248,80	1,96
53	248,80	1,69
54	248,80	1,96
55	248,80	1,96
56	248,80	1,96
57	248,80	1,69
58	248,80	1,69
59	248,80	1,69
60	248,80	1,96
61	248,80	1,96
62	248,80	1,96
63	248,80	1,96
64	248,80	1,96
65	248,80	1,96
66	248,80	1,96
67	248,80	1,69
68	248,80	1,69
69	248,80	1,96

70	248,80	17,64
71	248,80	19,36
72	248,80	19,36
73	248,80	19,36
74	248,80	19,36
75	248,80	19,36
76	248,80	19,36
77	248,80	19,36
78	248,80	19,36
79	248,80	19,36
80	248,80	19,36
81	248,80	19,36
82	248,80	19,36
83	248,80	19,36
84	248,80	19,36
85	248,80	19,36
86	248,80	19,36
87	248,80	19,36
88	248,80	19,36
89	248,80	19,36
90	248,80	19,36
91	248,80	19,36
92	248,80	19,36
93	248,80	19,36
94	248,80	19,36
95	248,80	19,36
96	248,80	19,36
97	248,80	19,36
98	248,80	19,36
99	248,80	19,36
100	248,80	19,36
101	248,80	19,36
102	248,80	19,36
103	248,80	19,36
104	248,80	19,36
105	248,80	19,36
106	248,80	19,36
107	248,80	19,36
108	248,80	118,81
109	248,80	102,01
110	248,80	102,01
111	248,80	100,00
112	248,80	100,00
113	248,80	102,01
114	248,80	102,01
115	248,80	102,01
116	248,80	102,01
117	248,80	100,00
118	248,80	100,00
119	248,80	102,01
120	248,80	100,00
121	248,80	102,01

122	248,80	100,00
123	248,80	102,01
124	248,80	102,01
125	248,80	100,00
126	248,80	100,00
127	248,80	100,00
128	248,80	102,01
129	248,80	100,00
130	248,53	94,62
131	247,72	81,27
132	246,91	67,41
133	246,11	53,46
134	245,32	43,83
135	244,54	34,06
136	243,76	24,59
137	242,99	18,39
138	242,22	11,72
139	241,47	7,11
140	240,72	3,67
141	239,97	1,62
142	239,23	0,19
143	238,50	0,09
144	237,78	0,85
145	237,06	2,70
146	236,34	107,02
147	235,64	79,90
148	234,94	67,87
149	234,24	56,91
150	233,56	47,00
151	232,87	38,11
152	232,20	30,22
153	231,53	23,30
154	230,86	17,32
155	230,20	12,27
156	229,55	8,12
157	228,90	4,85
158	228,26	2,44
159	227,62	0,86
160	226,99	0,04
161	226,37	0,11
162	225,75	0,90
163	225,13	2,45
164	224,53	4,73
165	223,92	7,72
166	223,32	11,40
167	222,73	15,76
168	222,14	20,78
169	221,56	26,43
170	220,98	32,71
171	220,41	39,59
172	219,84	48,45
173	219,28	55,11

174	218,72	63,71
175	218,16	72,85
176	217,62	82,51
177	217,07	92,69
178	216,53	103,36
179	216,00	114,51
180	215,47	126,13
181	214,94	138,20
182	214,42	150,71
183	213,91	163,65
184	213,40	9,58
185	212,89	5,24
186	212,39	2,84
187	211,89	1,66
188	211,39	0,48
189	210,90	0,04
190	210,42	0,03
191	209,94	0,44
192	209,46	1,54
193	208,99	2,60
194	208,52	4,34
195	208,05	7,01
196	207,59	9,66
197	207,14	12,00
198	206,68	15,34
199	206,23	19,06
200	205,79	23,15
201	205,35	27,59
202	204,91	32,37
203	204,48	37,49
204	204,05	42,94
205	203,62	48,70
206	203,20	54,77
207	202,78	62,72
208	202,37	67,81
209	201,95	74,75
210	201,55	81,97
211	201,14	89,45
212	200,74	99,18
213	200,34	105,18
214	199,95	113,42
215	199,56	121,89
216	199,17	132,88
217	198,79	139,50
218	198,41	148,62
219	198,03	157,96
220	197,66	167,49
221	197,29	177,22
222	196,92	53,59
223	196,56	51,21
224	196,20	46,18
225	195,84	41,44

226	195,48	37,00
227	195,13	32,85
228	194,78	28,97
229	194,44	25,37
230	194,09	22,04
231	193,75	18,97
232	193,42	16,15
233	193,08	13,58
234	192,75	11,25
235	192,43	9,16
236	192,10	7,29
237	191,78	5,66
238	191,46	4,24
239	191,14	3,04
240	190,83	2,04
241	190,52	1,25
242	190,21	0,65
243	189,90	0,25
244	189,60	0,04
245	189,30	0,01
246	189,00	0,16
247	188,71	0,48
248	188,41	0,97
249	188,12	1,63
250	187,84	2,45
251	187,55	3,42
252	187,27	4,55
253	186,99	5,82
254	186,71	7,24
255	186,43	8,80
256	186,16	10,49
257	185,89	12,32
258	185,62	14,27
259	185,36	7,53
260	185,09	68,76
261	184,83	66,11
262	184,57	61,97
263	184,31	56,47
264	184,06	54,17
265	183,81	50,52
266	183,56	45,67
267	183,31	42,37
268	183,06	40,50
269	182,82	37,45
270	182,58	33,39
271	182,34	31,79
272	182,10	29,17
273	181,87	26,69
274	181,63	24,33
275	181,40	22,10
276	181,17	19,11
277	180,94	18,01

278	180,72	16,15
279	180,50	14,41
280	180,27	12,77
281	180,05	11,25
282	179,84	9,22
283	179,62	8,53
284	179,41	6,80
285	179,20	6,23
286	178,99	5,22
287	178,78	4,31
288	178,57	3,50
289	178,37	2,45
290	178,16	2,14
291	177,96	1,59
292	177,76	1,13
293	177,56	0,58
294	177,37	0,32
295	177,17	0,22
296	176,98	0,08
297	176,79	1,19
298	176,60	28,10
299	176,41	26,14
300	176,23	24,28
301	176,04	22,49
302	175,86	20,79
303	175,68	19,17
304	175,50	17,63
305	175,32	16,17
306	175,14	14,78
307	174,97	13,47
308	174,80	12,22
309	174,62	11,05
310	174,45	9,94
311	174,28	8,91
312	174,12	7,94
313	173,95	7,03
314	173,79	6,18
315	173,62	5,40
316	173,46	4,67
317	173,30	4,00
318	173,14	3,39
319	172,98	2,84
320	172,83	2,33
321	172,67	1,89
322	172,52	1,49
323	172,37	1,14
324	172,22	0,84
325	172,07	0,59
326	171,92	0,38
327	171,77	0,22
328	171,63	0,11
329	171,48	0,03

330	171,34	0,00
331	171,20	0,01
332	171,06	0,06
333	170,92	0,08
334	170,78	0,27
335	170,64	6,45
336	170,50	0,01
337	170,37	0,05
338	170,24	0,13
339	170,10	0,25
340	169,97	0,39
341	169,84	0,57
342	169,71	0,79
343	169,59	1,03
344	169,46	1,30
345	169,33	1,60
346	169,21	1,93
347	169,09	2,29
348	168,96	2,68
349	168,84	3,09
350	168,72	3,53
351	168,60	3,99
352	168,48	4,48
353	168,37	4,99
354	168,25	5,52
355	168,14	6,07
356	168,02	6,65
357	167,91	7,25
358	167,80	7,86
359	167,68	8,50
360	167,57	9,15
361	167,47	9,83
362	167,36	9,88
363	167,25	11,22
364	167,14	11,95
365	167,04	12,69
366	166,93	13,45
367	166,83	14,22
368	166,73	15,00
369	166,62	15,80
370	166,52	16,62
371	166,42	17,44
372	166,32	18,28
373	166,23	14,64
374	166,13	0,86
375	166,03	0,69
376	165,94	0,54
377	165,84	0,41
378	165,75	0,30
379	165,65	0,21
380	165,56	0,13
381	165,47	0,07

382	165,38	0,03
383	165,29	0,01
384	165,20	0,00
385	165,11	0,01
386	165,02	0,03
387	164,93	0,07
388	164,85	0,12
389	164,76	0,19
390	164,68	0,27
391	164,59	0,37
392	164,51	0,48
393	164,43	0,60
394	164,35	0,73
395	164,26	0,88
396	164,18	1,03
397	164,10	1,20
398	164,02	1,38
399	163,95	1,57
400	163,87	1,77
401	163,79	1,98
402	163,72	2,21
403	163,64	2,44
404	163,56	2,68
405	163,49	2,93
406	163,42	3,18
407	163,34	3,45
408	163,27	3,72
409	163,20	4,01
410	163,13	4,30
411	163,06	22,62
412	162,99	23,88
413	162,92	23,20
414	162,85	22,54
415	162,78	21,90
416	162,71	21,27
417	162,65	20,66
418	162,58	20,06
419	162,51	19,47
420	162,45	18,90
421	162,38	18,34
422	162,32	17,80
423	162,25	17,26
424	162,19	16,74
425	162,13	16,24
426	162,07	15,74
427	162,01	15,26
428	161,94	14,78
429	161,88	14,32
430	161,82	13,87
431	161,77	13,43
432	161,71	13,01
433	161,65	12,59

434	161,59	12,18
435	161,53	11,79
436	161,48	11,40
437	161,42	11,02
438	161,36	10,65
439	161,31	10,30
440	161,25	9,95
441	161,20	9,61
442	161,15	9,28
443	161,09	8,95
444	161,04	8,64
445	160,99	8,33
446	160,93	8,03
447	160,88	7,74
448	160,83	7,46
449	160,78	23,82
450	160,73	24,31
451	160,68	23,82
452	160,63	23,34
453	160,58	23,84
454	160,53	23,37
455	160,49	22,90
456	160,44	21,51
457	160,39	21,08
458	160,34	20,65
459	160,30	21,14
460	160,25	19,81
461	160,21	19,41
462	160,16	19,89
463	160,12	18,62
464	160,07	18,24
465	160,03	17,87
466	159,98	18,34
467	159,94	17,98
468	159,90	17,61
469	159,85	16,44
470	159,81	16,10
471	159,77	15,76
472	159,73	15,43
473	159,69	15,11
474	159,65	14,80
475	159,61	14,49
476	159,57	14,95
477	159,53	13,89
478	159,49	14,34
479	159,45	13,31
480	159,41	13,03
481	159,37	12,75
482	159,33	13,20
483	159,30	12,22
484	159,26	11,96
485	159,22	12,39

486	159,18	12,84
487	159,15	0,00
488	159,11	0,04
489	159,08	0,05
490	159,04	0,07
491	159,00	0,04
492	158,97	0,11
493	158,94	0,07
494	158,90	0,09
495	158,87	0,11
496	158,83	0,22
497	158,80	0,25
498	158,77	0,28
499	158,73	0,32
500	158,70	0,36
501	158,67	0,40
502	158,64	0,32
503	158,61	0,48
504	158,57	0,39
505	158,54	0,57
506	158,51	0,62
507	158,48	0,67
508	158,45	0,56
509	158,42	0,77
510	158,39	0,65
511	158,36	0,70
512	158,33	0,75
513	158,30	0,80
514	158,28	1,05
515	158,25	1,11
516	158,22	1,17
517	158,19	1,23
518	158,16	1,08
519	158,14	1,36
520	158,11	1,42
521	158,08	1,49
522	158,05	1,55
523	158,03	1,62
524	158,00	13,68
525	157,97	13,14
526	157,95	13,33
527	157,92	13,52
528	157,90	13,71
529	157,87	13,89
530	157,85	14,08
531	157,82	14,27
532	157,80	14,46
533	157,77	14,64
534	157,75	14,83
535	157,73	15,01
536	157,70	15,20
537	157,68	15,38

538	157,65	15,56
539	157,63	15,75
540	157,61	15,93
541	157,59	16,11
542	157,56	16,29
543	157,54	16,47
544	157,52	16,65
545	157,50	16,83
546	157,48	17,01
547	157,45	17,19
548	157,43	17,37
549	157,41	17,55
550	157,39	17,72
551	157,37	17,90
552	157,35	18,07
553	157,33	18,25
554	157,31	18,42
555	157,29	18,60
556	157,27	18,77
557	157,25	18,94
558	157,23	19,11
559	157,21	19,28
560	157,19	19,45
561	157,17	19,62
562	157,15	4,20
563	157,13	5,60
564	157,11	5,69
565	157,10	5,78
566	157,08	5,87
567	157,06	5,96
568	157,04	6,04
569	157,02	6,13
570	157,01	6,22
571	156,99	6,31
572	156,97	6,40
573	156,95	6,48
574	156,94	6,57
575	156,92	6,66
576	156,90	6,74
577	156,89	6,83
578	156,87	6,92
579	156,85	7,00
580	156,84	7,09
581	156,82	7,17
582	156,81	7,26
583	156,79	7,34
584	156,77	7,43
585	156,76	7,51
586	156,74	7,60
587	156,73	7,68
588	156,71	7,77
589	156,70	7,85

590	156,68	7,93
591	156,67	8,02
592	156,65	8,10
593	156,64	8,18
594	156,63	8,26
595	156,61	8,35
596	156,60	8,43
597	156,58	8,51
598	156,57	8,59
599	156,56	8,67
600	156,54	13,26
601	156,53	17,04
602	156,52	16,93
603	156,50	16,82
604	156,49	16,72
605	156,48	16,61
Somatório do Erro <sup>2</sup>		11661,60

Anexo 4: Flowsheet do processo de controlo em malha aberta implementado no *simulink*

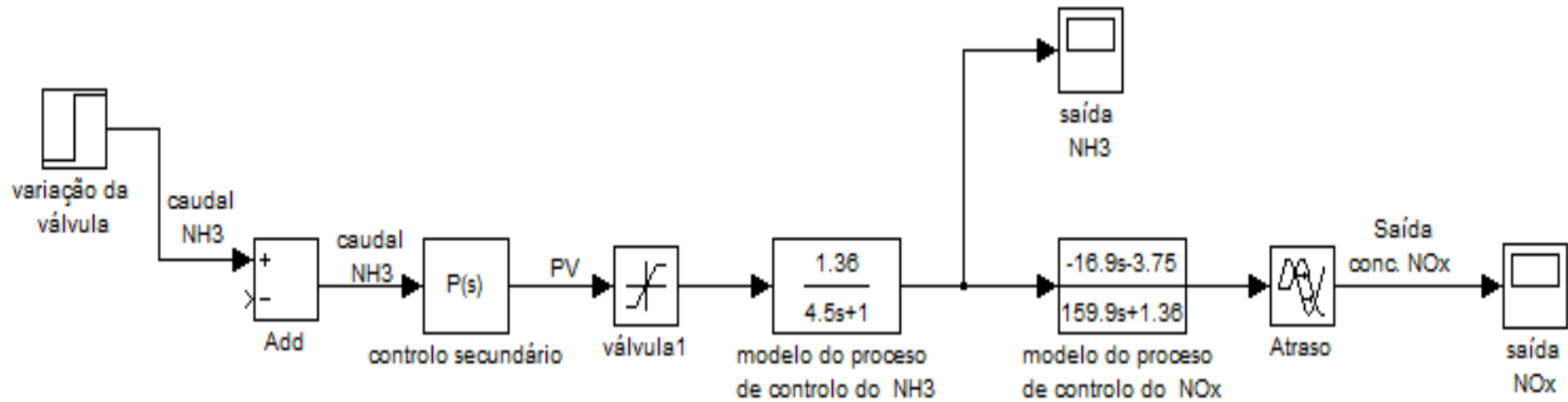


Figura 44: Flowsheet do processo de controlo da emissão do NOx e caudal de amónia em malha aberta, implementado no *simulink*.