



**MARCOS FLÁVIO CORRÊA DE MELLO**

**ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE DIOXINAS E  
FURANOS NA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS  
PERIGOSOS EM DIFERENTES REGIÕES DE  
MINAS GERAIS**

**LAVRAS - MG**

**2017**

**MARCOS FLÁVIO CORRÊA DE MELLO**

**ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE DIOXINAS E FURANOS NA  
INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS PERIGOSOS EM DIFERENTES  
REGIÕES DE MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologias e Inovações ambientais, área de concentração em Gestão de Resíduos e Efluentes, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Ronaldo Fia

Orientador

**LAVRAS - MG**

**2017**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Mello, Marcos Flávio Corrêa de.

Estimativa das emissões de dioxinas e furanos na incineração de  
resíduos perigosos em diferentes regiões de Minas Gerais / Marcos  
Flávio Corrêa de Mello. – Lavras : UFLA, 2016.

80 p. : il.

Orientador: Ronaldo Fia.

Dissertação (mestrado profissional)–Universidade Federal de  
Lavras, 2016.

Bibliografia.

1. Incineradores. Resíduos dos serviços de saúde. 2. Resíduos  
industriais. 3. Efluentes atmosféricos. 4. Sistemas de controle da  
poluição do ar. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

**MARCOS FLÁVIO CORRÊA DE MELLO**

**ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE DIOXINAS E FURANOS NA  
INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS PERIGOSOS EM DIFERENTES  
REGIÕES DE MINAS GERAIS**

***ESTIMATING EMISSIONS OF DIOXINS AND FURANS FROM  
HAZARDOUS WASTE INCINERATION IN DIFFERENT REGIONS OF  
MINAS GERAIS, BRAZIL***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologias e Inovações ambientais, área de concentração em Gestão de Resíduos e Efluentes, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 29 de agosto de 2016.

Profa. Dra. Sílvia de Nazaré Monteiro Yanagi UFLA

Dra. Rosângela Francisca de Paula Vitor Marques

Prof. Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro UFLA

Prof. Dr. Ronaldo Fia  
Orientador

**LAVRAS - MG**

**2017**

A Deus.

À minha mãe Eneida, pelo apoio e carinho em todas as etapas e por ser o meu maior exemplo de vida.

À minha esposa Nicole pela força, compreensão e amor incondicional.

À minha filha Gabriela.

Dedico

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Lavras, especialmente aos departamentos de Química (DQI), Engenharia (DEG), Ciências Florestais (DCF) e Ciências do Solo (DCS), que contribuíram com o programa (PPGTIA).

À diretoria de Meio Ambiente da UFLA, especialmente à Adelir, Zuy e Gisele que se esforçaram muito para o sucesso do curso.

Ao Professor Ronaldo Fia, pela orientação, paciência, presteza e pelas contribuições que enriqueceram tanto este trabalho.

Aos mestres e colegas de PPGTIA, por dividirem tanto conhecimento e fraternidade.

À minha família que sempre me deu a estrutura e o apoio para alcançar meus sonhos.

Às minhas esposa e filha por serem a razão de tudo que faço.

Aos meus alunos que, provavelmente, me ensinaram mais do que eu a eles.

**MUITO OBRIGADO!**

**“A única maneira de fazer um excelente trabalho é amar o que você faz.”**

**(Steve Jobs)**

## RESUMO

A incineração de resíduos perigosos emite grandes quantidades de dioxinas e furanos todos os anos na atmosfera. Dioxinas e furanos (PCDD/F) são substâncias classificadas como Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) que causam diversos efeitos negativos à saúde humana e aos ecossistemas. Objetivou-se, neste trabalho, estimar as emissões de PCDD/F a partir de empreendimentos incineradores de resíduos perigosos em Minas Gerais. Foram levantados, junto ao Sistema Integrado de Meio Ambiente do estado de Minas Gerais, dados sobre a quantidade de resíduos e os planos de teste de queima dos empreendimentos licenciados em operação no ano de 2015, e que incineram resíduos de serviço de saúde (RSS) e resíduos industriais (RI). Como resultado, ficou evidente que as emissões de PCDD/F provenientes da incineração de resíduos em diversas regiões de Minas Gerais aumentaram, acentuadamente, nos últimos sete anos, cerca de dez vezes entre 2008 e 2015. Para os diferentes cenários avaliados, e cerca de 97 mil toneladas de resíduos incinerados, estima-se a geração entre 54,21 e 71,92 g t<sup>-1</sup> TEQ. Esses números alarmantes podem ser explicados não somente pelo número de empreendimentos que é quatro vezes maior em 2015, mas também, em razão da tecnologia empregada no processo não ser capaz de manter baixos níveis de emissão durante toda a operação. Os resultados também evidenciam a necessidade de investimentos em novas tecnologias ambientais que sejam capazes de reduzir as emissões de PCDD/F provenientes da incineração de resíduos e, assim, atingir as metas de redução preconizadas pela Convenção de Estocolmo sobre POPs, a qual foi assinada pelo Brasil em 2001.

**Palavras-chave:** Incineradores. Resíduos dos serviços de saúde. Resíduos industriais. Efluentes atmosféricos. Sistemas de controle da poluição do ar.

## ABSTRACT

Incineration of hazardous waste emits great amount of dioxins and furans every year in the atmosphere. Dioxins and furans (PCDD/F) are substances classified as Persistent Organic Pollutants (POPs), which cause negative effects to human health and to ecosystems. The aim of this study was to estimate PCDD/F emissions from hazardous waste incineration in different regions in the state of Minas Gerais (Brazil). Data related to process and production was extracted from the environmental license documents of the companies, which incinerate healthcare and industrial waste, listed by the Integrated Environmental Information System of Minas Gerais in 2015. The results evidenced that PCDD/F emissions from incineration of healthcare and industrial waste in different regions of Minas Gerais increased in about ten times between 2008 and 2015. The evaluation of different sceneries presented estimates in the range of 54,21 and 71,92 g t<sup>-1</sup> TEQ for about 97 thousand tons of incinerated waste. Such alarming results may be explained not only by the raise in the number of incineration plants within the state, which is four times higher in 2015, but also because the technology employed in this activity is not able to keep emissions at low levels during the entire operation. The results of this study also indicate the necessity of investments in new environmental technologies in order to reduce PCDD/F emissions from waste incineration and; therefore, achieve the reduction goals as preconized by Stockholm Convention 2001 on POPs, which was signed by Brazil.

**Keywords:** Incinerators. Healthcare waste. Industrial waste. Flue gas. Air pollution control devices.

## LISTA DE SIGLAS

CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COV	Compostos orgânicos voláteis
MP	Material particulado
MP <sub>10</sub>	Material particulado composto por partículas menores que 10 $\mu$ m
MP <sub>2,5</sub>	Material particulado composto por partículas menores que 2,5 $\mu$ m
Nm <sup>3</sup>	Normal metro cúbico
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrogênio
OMS	Organização Mundial da Saúde
PCBs	Bifenilas Policloradas
PCDD	Dioxinas
PCDD/F	Dioxinas e Furanos
PCDF	Furanos
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
POPs	Poluentes Orgânicos Persistentes
RI	Resíduos Industriais
RSS	Resíduos do Serviço de Saúde
SCPAr	Sistemas de Controle da Poluição do Ar
SCR	Redução Catalítica Seletiva
SO <sub>x</sub>	Óxidos de enxofre
TEF	Fator de equivalência de toxicidade
TEQ	Toxicidade Equivalente
WTE	Tratamento térmico dos resíduos com o aproveitamento energético

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	13
<b>2.1</b>	<b>Desenvolvimento sustentável e gestão ambiental</b> .....	13
<b>2.2</b>	<b>Gestão de resíduos</b> .....	13
<b>2.3</b>	<b>Tratamento térmico de resíduos perigosos por incineração</b> .....	17
<b>2.4</b>	<b>Sistemas de Controle da Poluição do Ar (SCPAr)</b> .....	19
<b>2.5</b>	<b>Poluentes Atmosféricos</b> .....	22
<b>2.6</b>	<b>Limites máximos de emissão de poluentes</b> .....	25
<b>2.7</b>	<b>Dioxinas e Furanos</b> .....	27
<b>2.7.1</b>	<b>Caracterização das dioxinas e Furanos</b> .....	27
<b>2.7.2</b>	<b>Rotas de exposição às dioxinas e furanos e danos à saúde</b> .....	29
<b>2.7.3</b>	<b>Acidentes ambientais com dioxinas e furanos</b> .....	32
<b>2.7.4</b>	<b>Inventário de fontes e estimativas de emissão de dioxinas e furanos</b> .....	34
<b>2.7.5</b>	<b>Formação de PCDD/F nos processos de tratamento térmico</b> .....	38
<b>2.7.6</b>	<b>Tecnologias para a redução das emissões de PCDD/F</b> .....	40
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	49
<b>3.1</b>	<b>Identificação dos incineradores instalados em Minas Gerais</b> .....	49
<b>3.2</b>	<b>Coleta de dados</b> .....	49
<b>3.3</b>	<b>Descrição da metodologia UNEP (2013) e classificação dos empreendimentos quanto às emissões atmosféricas de PCDD/F</b> .....	50
<b>3.4</b>	<b>Obtenção das quantidades de resíduos perigosos incinerados</b> .....	52
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	53
<b>4.1</b>	<b>Identificação dos incineradores</b> .....	53
<b>4.2</b>	<b>Quantidades de resíduos incinerados e regimes de produção</b> .....	54
<b>4.3</b>	<b>Caracterização e classificação dos incineradores e SCPAr</b> .....	57
<b>4.4</b>	<b>Estimativa das emissões de PCDD/F</b> .....	60
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	67
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	69
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	71

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável deve ser a premissa básica para a redefinição dos padrões de produção e consumo. Há mais de duzentos anos, foi publicado “O ensaio sobre o princípio da população” em que Malthus (1798) demonstrava sua visão pessimista sobre os padrões de desenvolvimento da nossa sociedade. Mas foi em 1987 que o relatório de Brundtland, intitulado “Nosso Futuro Comum”, divulgou mundialmente o termo desenvolvimento sustentável e convenceu lideranças a adotarem uma nova visão de futuro. De acordo com esse conceito, as nações devem adotar modelos de desenvolvimento que permitam atender às suas necessidades sem prejudicar a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas próprias necessidades (WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT, 1987).

Nesse contexto, a gestão de resíduos é uma ferramenta de grande importância quando se deseja atingir a sustentabilidade. Os rejeitos da atividade antrópica são poluentes e, por isso, degradam, contaminam e reduzem a qualidade do meio e da saúde humana. Muito pode e deve ser feito para amenizar o problema: não gerar resíduos; repensar os projetos dos bens de consumo para evitar a geração de rejeitos; reduzir a geração; reutilizar antes de descartar e reciclar sempre que possível.

Por outro lado, alguns materiais contêm características de periculosidade (inflamabilidade, patogenicidade, corrosividade, toxicidade e reatividade) e, por isso, precisam de um tratamento adequado. Alguns exemplos são os resíduos dos serviços de saúde (RSS) e alguns resíduos industriais (RI). Nesses casos, o tratamento térmico por incineração é altamente eficiente. A incineração não só elimina a patogenicidade como também reduz significativamente o volume do resíduo.

No processo de incineração, a combustão dos gases, em temperaturas acima de 1.000°C, também é eficaz na destruição de compostos nocivos, como

os Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs). Entretanto, os gases provenientes desse processo contêm alta quantidade e diversidade de elementos químicos e moléculas, que vão estabelecer novas ligações entre si, à medida que a temperatura do sistema é reduzida. Em razão desse fato, as plantas industriais de tratamento térmico são equipadas com Sistemas de Controle da Poluição do Ar (SCPAr), com o intuito de evitar a formação, reter ou destruir tais compostos.

As dioxinas e furanos (PCDD/F) são as substâncias mais tóxicas emitidas na incineração de resíduos, sendo considerados Poluentes Orgânicos Persistentes. São tão prejudiciais ao meio ambiente e à saúde pública que estão entre os doze poluentes mais perigosos, denominados *Dirty Dozen* (UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAM, 2001).

A fim de reduzir a emissão de PCDD/Fs, a União Europeia e mais 92 países assinaram a Convenção de Estocolmo sobre POP's em 2001, comprometendo-se a reduzir as emissões desses poluentes. A elaboração de um inventário nacional de fontes e estimativa de emissões de dioxinas e furanos é uma das exigências desse acordo. O inventário brasileiro foi publicado em 2013 e apresenta resultados referentes ao ano de 2008.

Objetivou-se, neste trabalho, estimar as emissões de dioxinas e furanos em instalações licenciadas para a incineração de resíduos sólidos em diferentes regiões de Minas Gerais, no ano de 2015, assim como avaliar de forma comparativa a redução das emissões de PCDD/F nos últimos anos.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Desenvolvimento sustentável e gestão ambiental**

A sustentabilidade é um princípio que se apoia em três pilares fundamentais: justiça social, prosperidade econômica e equilíbrio ambiental. O conceito de desenvolvimento sustentável foi divulgado mundialmente pelo relatório de Brundland em 1987, também intitulado “Nosso Futuro Comum”. Esse relatório das Nações Unidas apontou a necessidade de se repensar padrões de produção e consumo com o objetivo de preservar a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas próprias necessidades (WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT, 1987).

Nesse contexto, a gestão ambiental torna-se imprescindível para preservar o equilíbrio ambiental. Segundo Barbieri (2011), a gestão ambiental compreende todos os esforços com intuito de se causar um efeito positivo no ambiente. Essa prática observa e promove ações de cunho administrativo e operacional, assim como a formulação de diretrizes que levam a alcançar um ambiente mais equilibrado.

### **2.2 Gestão de resíduos**

A gestão de resíduos é uma das áreas de atuação da gestão ambiental e compreende todos os esforços, ações e diretrizes que favoreçam o melhor aproveitamento e destinação dos materiais ao longo de toda cadeia de produção e consumo.

No Brasil, a gestão de resíduos observa a Lei 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). Os objetivos dessa lei determinam que as ações relacionadas à gestão dos resíduos obedeçam a uma hierarquia de sustentabilidade entre os processos de mitigação dos problemas advindos dos resíduos.

O processo mais sustentável é não gerar resíduos e, por isso, deve ser preferível a todos os outros. Godecke, Naime e Figueiredo (2012) cita as mudanças nos hábitos de consumo e atitudes como o caminho para a não geração. Além disso, as empresas devem repensar suas atividades em relação ao desperdício de insumos, a racionalização de embalagens e a otimização de processos.

A implantação do conceito de produção mais limpa nas empresas está alinhada com esse objetivo. Pimenta e Gouvinhas (2012) estudaram o processo de produção de pão francês em uma padaria. Os autores testaram a substituição de parte dos insumos (farinha, manteiga, sal e fermento) por outro (farinha pré-mescla). O resultado foi a não geração de 35%, em peso, dos resíduos gerados (sacos de rafia, baldes de manteiga e embalagens plásticas).

Nos casos em que a não geração é impraticável, deve-se buscar a redução do volume gerado e/ou da periculosidade dos resíduos. A segregação dos resíduos dos serviços de saúde (RSS), nas unidades de saúde, como hospitais e clínicas, reduz o volume de resíduos perigosos, já que resíduos de escritório e cozinha não são classificados como perigosos, desde que não haja qualquer interação com resíduos perigosos (SEVERO et al., 2012).

A reutilização é um processo que também visa à não geração de resíduos. Um exemplo acontece com produtos que possuem embalagens retornáveis ou, ainda, quando lavadores da indústria têxtil utilizam circuito de água fechado, com tratamento e reutilização da mesma (MELO, 2005).

Já, a reciclagem envolve a transformação das características físico-químicas dos materiais. É o quarto processo na ordem de prioridade, sendo recomendados quando a reutilização não é mais possível. Os pneus, por exemplo, podem ser reciclados de diversas formas: coprocessamento de pneus com a rocha de xisto pirobetuminoso; pavimentação com asfalto-borracha;

queima de pneus em caldeiras; utilização na construção civil, entre outros (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008).

Outro exemplo é a areia proveniente do processo de fundição de peças metálicas. Os moldes são confeccionados de areia aglomerada, cuja composição é dada por um material granular refratário (areia base), água e aditivos orgânicos e/ou bentonitas como ligantes. Estima-se que a produção de uma tonelada de metal fundido gera, aproximadamente, uma tonelada de resíduo. A areia de fundição é um resíduo rico em cloretos, elemento essencial para a formação de dioxinas durante o processo de combustão (SILVA et al., 2011).

Entre os ligantes orgânicos utilizados na produção de moldes estão as resinas furânicas, fenólicas e uretânicas como apresentado por Fagundes et al. (2010). As resinas orgânicas, principalmente as fenólicas, são importantes fontes de fenóis, precursores da formação de PCDD/F.

Após esgotadas as possibilidades de reinclusão dos materiais no ciclo do produto, eles devem ser dispostos em locais adequados. Antes disso, porém, é necessário verificar se os rejeitos apresentam alguma característica de periculosidade.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR 10004:2004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), classifica os resíduos sólidos quanto à periculosidade, considerando o processo gerador, os constituintes, as características físicas e químicas dos resíduos e o impacto à saúde e ao meio ambiente que o resíduo pode causar. Para o efeito da norma, resíduos sólidos são classificados da seguinte maneira:

- a) resíduos classe I - Perigosos;
- b) resíduos classe II – Não perigosos; e estes podem ainda ser classificados em resíduos classe II A – Não inertes, e resíduos classe II B – Inertes.

Os resíduos perigosos (Classe I) são classificados assim, por apresentarem, pelo menos, alguma das cinco características de periculosidade: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Parte dos resíduos dos serviços de saúde (RSS) e alguns dos resíduos industriais (RI) podem exemplificar a Classe I, a partir desse sistema de classificação.

Os resíduos de hospitais, clínicas e laboratórios possuem alto potencial de periculosidade. Materiais contaminados com sangue, peças anatômicas, materiais perfuro-cortantes, vacinas, meios de cultura e outros materiais, que apresentam alto grau de patogenicidade, estão contidos na Classe I.

Indústrias e unidades do serviço de saúde podem agir eficientemente na segregação de forma a reduzir os volumes de resíduos perigosos gerados. Entretanto, dadas as características especiais desses tipos de resíduos, a destinação mais adequada aponta para o tratamento térmico dos resíduos (GOMES; ESTEVES, 2012; SILVA; VON SPERLING; BARROS, 2014).

Os resíduos provenientes de várias indústrias e postos de gasolina ou oficinas são classificados como Classe I – perigosos. Lodos de pintura industrial, óleo lubrificante usado e materiais contaminados por ele, equipamentos de proteção individual (EPI) e retalhos da indústria de couro banhados em cromo. Esses são materiais com elevada toxicidade, corrosividade e inflamabilidade.

Coelho (2011) propôs o Índice de Tecnologia Mais Limpa (IT+L) e analisou três destinações para resíduos industriais: aterro, incineração e tecnologia Waste-To-Energy (WTE). WTE se refere ao tratamento térmico dos resíduos com o aproveitamento do calor produzido no processo para gerar energia mecânica e, posteriormente, elétrica. Esta foi considerada a destinação mais sustentável entre todas. Em segundo lugar, ficou a incineração e aterros em terceiro.

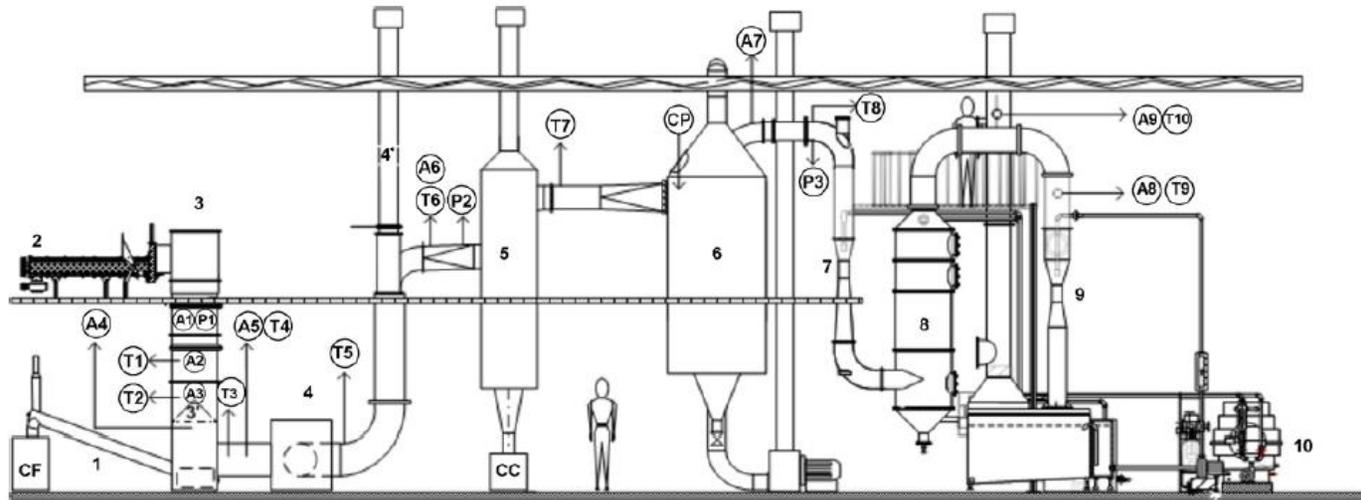
### **2.3 Tratamento térmico de resíduos perigosos por incineração**

Na Figura 1, está apresentada uma unidade de tratamento térmico de resíduos perigosos no Brasil (GODINHO et al., 2009).

O processo de tratamento térmico inicia com a alimentação do resíduo no sistema. O resíduo é introduzido na câmara de alimentação (3) pelo sistema de alimentação (2). Essa câmara é hermeticamente fechada por duas tampas que abrem e fecham, alternadamente, para evitar o refluxo dos gases.

Em seguida, o resíduo é depositado sobre a grelha (3) para gaseificação. Nessa etapa até 98% dos resíduos são transformados em gás, e a temperatura pode chegar aos 900°C. As cinzas resultantes são retiradas pelo extrator de cinzas (1), enquanto os gases seguem para o reator de oxidação (4) ou câmara de combustão. É nesse ponto que ocorre a combustão completa dos gases.

Figura 1 - Unidade de tratamento térmico de resíduos perigosos.



Legenda: 1- extrator de cinzas, 2- sistema de alimentação, 3- Câmara de alimentação, 3'- Grelha, 4- Reator de oxidação, 5- Ciclone, 6- Trocador de calor, 7- Lavador Venturi, 8- Lavador de gás, 9- Aspersor do Venturi, 10- torre de resfriamento. T: termopares, P: manômetros (pressão), A: Análise do gás.

Fonte: Godinho et al. (2009).

O reator trabalha a uma temperatura superior ou igual a 900°C e é projetado para um tempo de residência dos gases de 2 segundos nessa temperatura. Isso garante a quebra dos compostos mais fortemente ligados e muitas vezes nocivos.

A partir desse ponto, os gases provenientes da combustão completa são menos prejudiciais à saúde e ao ambiente. Entretanto, ainda contém muito calor e substâncias que podem favorecer o surgimento de poluentes mais nocivos durante o resfriamento do efluente atmosférico.

Já que os efluentes gasosos gerados pelo incinerador são ainda nocivos à saúde humana e ao meio ambiente, os sistemas de controle de poluição do ar (SCPAr) são fundamentais para atingir os limites máximos de emissão estabelecidos na Resolução do CONAMA nº 316 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002).

#### **2.4 Sistemas de Controle da Poluição do Ar (SCPAr)**

Os SCPAr são conjuntos de equipamentos, dispositivos e técnicas que visam a reduzir a emissão de poluentes na atmosfera. Isso pode ser feito de três maneiras: inibindo a formação do composto, retendo o poluente ou destruindo-o durante o processo de tratamento dos gases (BUEKENS; HUANG, 1998).

Existem diferentes dispositivos e diferentes maneiras de associá-los em um sistema para mitigar o risco das emissões.

O ciclone ou separador ciclônico, é um dispositivo utilizado para remover as partículas sólidas de maior tamanho do efluente. Esse dispositivo possui eficiência de remoção de 50% para partículas de 10 µm (MP<sub>10</sub>), mas a eficiência cai para 10% para partículas menores que 2,5 µm (MP<sub>2,5</sub>) de diâmetro. É um equipamento que suporta temperaturas muito elevadas e, por isso, são empregados na primeira etapa de tratamento dos gases.

A função do ciclone é criar um fluxo ciclônico, para que a força centrífuga faça com que as partículas maiores se choquem contra a superfície lateral interna e permaneçam em seu interior, enquanto o efluente escoar para a próxima etapa arrastando menos poluentes. Múltiplos ciclones podem ser combinados para aumentar a eficiência de remoção de material particulado (MP) (VEHLOW, 2015).

Os lavadores de gás são outro tipo de tecnologia amplamente utilizada na composição dos SCPAr. Existem diferentes projetos para esse tipo de dispositivo. Torres de spray, discos rotativos, lavadores de spray autoinduzido, ejetores, desintegradores e venturi, mas o fundamento básico consiste em remover as partículas sólidas em suspensão, por meio da aspersão de um líquido. A diferença de velocidade entre as partículas sólidas e líquidas promove, por impacto inercial, o aprisionamento das partículas nas gotas, que são levadas pela gravidade até o reservatório do líquido localizado na parte inferior do equipamento (EBERT; BUTTNER, 1996).

A adição de alcalinizantes como o hidróxido de sódio é comum em casos que se deseja regular o pH que pode apresentar valores muito baixos, em razão da acidez dos gases. Essa medida também ajuda a aumentar a vida útil do equipamento evitando a corrosão.

Em temperaturas mais amenas (40°C), essa tecnologia é eficiente para a remoção de PCDD/F também presentes na fase vapor, uma vez que ocorre a condensação em partículas (GUERRIERO et al., 2009).

Lothgren e Van Bavel (2005) conduziram um experimento onde foram medidas as concentrações de PCDD/F do efluente na entrada e saída de um lavador de gás. Os dados obtidos evidenciaram a ocorrência do efeito de memória, já que, na entrada, os níveis desses poluentes eram inferiores ao da saída. Os autores postularam que o fenômeno ocorreu, em razão da adsorção desses compostos pelas peças plásticas integrantes do dispositivo.

O precipitador eletrostático (PE) é um dispositivo que atua na remoção do material particulado presente nos gases. Esse equipamento pode operar em regime seco ou úmido. Du et al. (2016) mostraram, por meio de experimento, que um PE úmido a uma voltagem de 30 kV pode chegar a remover 20% mais partículas, em massa, do que um PE seco na mesma voltagem.

O princípio dessa tecnologia consiste em gerar um campo elétrico capaz de ionizar as moléculas dos gases próximas ao eletrodo de emissão. Quando entram em contato com as partículas em suspensão do efluente atmosférico, estas se tornam carregadas e são atraídas pelos eletrodos de captação. À medida que as camadas de material particulado se tornam mais espessas e a eficiência do equipamento é reduzida, um sistema de batimento faz com que essas partículas se soltem dos eletrodos e se depositem nas tremonhas (CHEN et al., 2014).

Um estudo de Guerriero et al. (2009) mostrou que a remoção de PCDD/F na fase particulada do efluente atmosférico é eficaz, porém não o é para as moléculas dessas substâncias na fase vapor.

O filtro de manga também está relacionado à remoção de material particulado do efluente atmosférico. Nesse dispositivo, o efluente atravessa um filtro que retém até 99% das partículas finas  $MP_{2,5}$ , entretanto há uma perda de carga considerável que restringe o tratamento de grandes volumes de gases.

Os materiais mais utilizados nesses filtros são algodão, nylon, fibra de vidro ou teflon. Outro material utilizado são as fibras de poli-imida, pois são termorresistentes, ou seja, têm boa durabilidade em condições de temperatura mais elevadas. Além disso, tem boa tenacidade e baixa emissão de gases (CERON; EINLOFT; LIGABUE, 2013).

Esses dispositivos são dotados de sistemas de ar comprimido com a função de remover as partículas aderidas ao material filtrante em intervalos regulares e depositá-las nos coletores para remoção posterior. Caso contrário, o

equipamento perderia eficiência e a perda de carga aumentaria indefinidamente até a saturação total do filtro (SALEEM et al., 2012)

Os dispositivos do SCPAr atuam em condições diferentes e usam princípios diferentes, portanto, são eficientes para determinados tipos de poluentes em determinadas condições de operação. Evidencia-se, assim, a necessidade de conhecer os principais poluentes gerados no processo de combustão.

## **2.5 Poluentes Atmosféricos**

Os poluentes atmosféricos são substâncias encontradas em concentrações suficientes na atmosfera, capazes de provocar efeitos adversos à saúde humana, à conservação de ecossistemas e alterações físico-químicas indesejáveis em espécies minerais (CARVALHO, 2009). Segundo Fiore, Naik e Leibensperger (2015), a qualidade do ar está fortemente relacionada às mudanças climáticas, que prejudicam os ecossistemas. No âmbito da saúde, a Organização Mundial da Saúde (2006) avaliou os riscos dos principais poluentes atmosféricos (MP, ozônio, dióxido de nitrogênio e dióxido de enxofre) e estabeleceu algumas diretrizes para redução dos impactos à saúde, causados pela poluição atmosférica.

Os poluentes podem ser originados de fontes naturais ou antrópicas e são classificados como primários quando são lançados na atmosfera em sua forma original (CO, CO<sub>2</sub>, NO, SO<sub>2</sub>). Entretanto, essas substâncias podem reagir na atmosfera formando novos compostos, como NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, os quais são denominados poluentes secundários (DRUMM et al., 2014). Alguns desses compostos são mais importantes, pois são encontrados em maior concentração ou possuem elevado potencial nocivo. Assim, as ações para a melhoria da qualidade do ar são direcionadas ao controle dos principais poluentes.

O dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é conhecido como o principal causador do efeito estufa. Apesar de também ser emitido por fontes naturais, a maior concentração desse poluente na atmosfera é oriunda da atividade antrópica, como os processos de combustão (veículos, indústrias, usinas termoeletricas, entre outros).

O monóxido de carbono (CO) é emitido como produto da combustão incompleta. No organismo, ele tende a se ligar com as hemoglobinas do sangue e prejudica o transporte de oxigênio para as células (OUTDOOR AIR POLLUTION, 2016)

Os óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) são emitidos, principalmente, em processos de combustão, incluindo incineração de resíduos, veículos automotores, refinarias, usinas termoeletricas e processos industriais em geral. Os óxidos de enxofre reagem na atmosfera produzindo  $\text{H}_2\text{SO}_4$  que precipita em forma de chuva ácida. Entre os efeitos negativos, podemos citar a perda de produtividade na agricultura, deterioração de patrimônio, perda de biodiversidade e problemas respiratórios (DRUM et al., 2014).

Os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), assim como os  $\text{SO}_x$ , são emitidos em maior proporção pelos processos de combustão. Também causam chuva ácida ( $\text{H}_2\text{O} + \text{HNO}_3$ ) e problemas respiratórios na população. De acordo com as diretrizes sobre qualidade do ar da Organização Mundial da Saúde (OMS, 2006), a média anual da concentração de  $\text{NO}_2$  não deve ultrapassar  $40 \mu\text{m}^{-3}$ , estudos mostraram que casos de bronquite em crianças asmáticas aumentam quando as concentrações de  $\text{NO}_2$  aumentam.

A emissão de compostos orgânicos voláteis (COV) é, exclusivamente, antropogênica. São provenientes da queima de combustíveis fósseis. As três maiores fontes desses poluentes na Ásia são processos de combustão estacionária, uso de tintas e solventes e transporte (KUROKAWA et al., 2013).

De acordo com OMS (2006), o ozônio ( $O_3$ ) é um oxidante foto-químico. Essa molécula é importante na mesosfera, pois atua como um filtro natural de raios UV. Entretanto, ozônio troposférico é um indicador das presenças de  $NO_x$  e COV, já que resulta de reações desses dois compostos na presença de luz solar e oxigênio.

O material particulado (MP) é caracterizado por partículas sólidas ou líquidas de pequeno diâmetro, na ordem de micrômetros, que ficam suspensas no ar. A composição dessas partículas varia. Zhang et al. (2007) estudaram a composição das partículas finas em 30 locais no continente asiático. Os compostos orgânicos representaram até 70% da massa de MP em algumas amostras, íons de sulfato e nitrato também foram encontrados em quantidades significativas (até 67% e até 28% respectivamente). Entre os tipos de MP e suas fontes, podemos citar a poeira, proveniente de degradação mecânica; a fumaça, advinda da combustão incompleta da matéria orgânica; os fumos, formados pela condensação de vapores metálicos; as cinzas, geradas na combustão do carvão; as névoas, *sprays* e gotículas resultantes de aspersão de tintas, pesticidas, ácido sulfúrico e outros materiais e, por fim; organismos vivos, como pólenes, fungos e bactérias (OMS, 2006).

Os efeitos nocivos à saúde estão diretamente relacionados ao tamanho das partículas. Partículas menores são mais prejudiciais que partículas maiores, já que são mais difíceis de serem filtradas pelos mecanismos biológicos de defesa durante a respiração. Por isso, há uma classificação desses poluentes, de acordo com o tamanho das partículas. O termo  $MP_{10}$  se refere às partículas menores que 10 micrometros e  $MP_{2,5}$  para partículas de até 2,5 micrometros. Além de causar alergias e problemas respiratórios, o material particulado é vetor de outros poluentes tóxicos como metais pesados e compostos orgânicos cancerígenos (OUTDOOR AIR POLLUTION, 2016).

Os poluentes orgânicos persistentes (POPs) constituem um grave problema, pois são muito resistentes aos processos de degradação naturais, permanecendo no meio por décadas. Um serviço ambiental de suma importância para os seres vivos é a capacidade que o meio possui de autodepuração. Isso significa que muitos poluentes lançados na atmosfera, no solo e nos corpos hídricos são dissociados, em razão dos processos biológicos, químicos e fotoquímicos. Entretanto, o tempo necessário para que isso ocorra depende de alguns fatores ambientais como umidade, acidez e luminosidade, bem como as características das substâncias. Esse período é chamado de persistência (BARBIERI, 2011).

Os POPs são extremamente voláteis e lipofílicos, o que favorece a bioacumulação e a biomagnificação. Na categoria de POPs, podemos incluir compostos como Dioxinas, DDT, Aldrin e Heptaclorobenzenos (BHC) (BARBIERI, 2011).

## **2.6 Limites máximos de emissão de poluentes**

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 316 (CONAMA, 2002) regulamenta a atividade de incineração de resíduos perigosos no Brasil. Essa norma define os limites máximos de emissão para cada poluente presente no efluente atmosférico dos sistemas de incineração (Tabela 1).

É notável o quanto o limite de emissão para dioxinas e furanos é mais baixo que outros poluentes. Isso se deve ao fato de que esses éteres são extremamente nocivos à saúde humana e ao meio ambiente.

Os resultados da concentração de PCDD/F medidos em incineradores ainda precisam ser padronizados antes de serem comparados aos limites máximos de emissão. O termo normal metro cúbico ( $Nm^3$ ) se refere às condições padrão para comparação das concentrações dos poluentes. De acordo

com European Commission (2006), as correções devem ser feitas para as seguintes condições: temperatura de 273 K, pressão de 101,3 kPa, 11% de oxigênio, base seca. Já CONAMA (2002) estabelece 7% de oxigênio para correção.

Tabela 1 - Limites máximos de emissão para incineração de resíduos perigosos no Brasil estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 316.

Poluente	Limite máximo de emissão
Óxidos de Enxofre (SO <sub>x</sub> )	280 mg Nm <sup>-3</sup>
Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> )	560 mg Nm <sup>-3</sup>
Monóxido de carbono (CO)	100 ppm Nm <sup>-3</sup>
Material Particulado (MP)	70 mg Nm <sup>-3</sup>
Compostos clorados inorgânicos	80 mg Nm <sup>-3</sup>
Compostos fluorados inorgânicos	5 mg Nm <sup>-3</sup>
Dioxinas e furanos	0,5 ηg TEQ Nm <sup>-3</sup>
Metais pesados classe 1	0,28 mg Nm <sup>-3</sup>
Metais pesados classe 2	1,4 mg Nm <sup>-3</sup>

Fonte: Adaptado da Resolução CONAMA n° 316 (CONAMA, 2002).

Segundo a União Europeia (EUROPEAN UNION, 2000), a emissão corrigida ( $E_C$ ) é obtida pela equação 1. Multiplica-se a concentração mensurada na chaminé ( $E_M$ ) por um coeficiente que pode ser calculado pela diferença entre as concentrações de oxigênio do ambiente (21%) e do padrão ( $O_{padrão}$ ) (7 ou 11%), dividido pela diferença entre as concentrações de oxigênio do ambiente (21%) e a medida na chaminé ( $O_{medido}$ ).

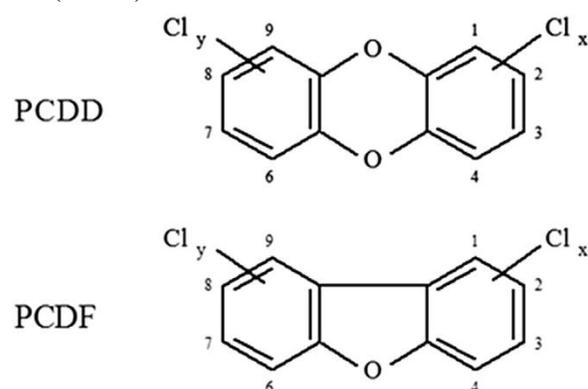
$$E_C = E_M \times \frac{21 - O_{Padrão}}{21 - O_{Medido}} \quad (1)$$

## 2.7 Dioxinas e Furanos

### 2.7.1 Caracterização das dioxinas e Furanos

Na Figura 2, podem ser visualizadas a estrutura e composição química das dioxinas e furanos.

Figura 2 - Estrutura e composição química das dioxinas (PCDD) e furanos (PCDF).



Fonte: Hoogenboom et al. (2015).

As dioxinas (*Polychlorinated dibenzo-p-dioxin*) ou PCDDs e furanos (*Polychlorinated dibenzo-p-furans*) ou PCDFs encontram-se entre as substâncias mais tóxicas produzidas pelo homem (MALISCH; KOTZ, 2014).

São classificadas como classes de éteres tricíclicos aromáticos e possuem propriedades semelhantes. As estruturas básicas, formadas por dois anéis aromáticos ligados por dois ou um átomo de oxigênio, podem apresentar variações quanto ao número e posição dos átomos de cloro ligados a elas.

As variações desses compostos são chamadas de congêneres e, juntos, as dioxinas e furanos formam 210 destes. A toxicidade dos congêneres diferem consideravelmente. Entre os 210 congêneres, apenas 17 apresentam toxicidade

significativa, em razão da substituição de hidrogênio com átomos de cloro, pelo menos, nas posições 2,3,7,8 (Figura 2) (VAN DEN BERG et al., 2006). Por isso, as metodologias desenvolvidas para unificar os valores de toxicidade e facilitar as medições das emissões dessas duas classes de substâncias definem o fator de equivalência de toxicidade (TEF) igual a 1 para o composto tetra clorado que apresenta um átomo de cloro em cada uma das posições 2,3,7,8, e fatores menores para todos os outros.

O controle de emissão desses poluentes é baseado na Toxicidade Equivalente (TEQ). A TEQ pode ser definida, de acordo com a equação 2, pela soma dos produtos da concentração de cada composto ( $C_i$ ) que é multiplicado pelo valor de TEF, sendo uma estimativa da atividade/toxicidade total da mistura com base na toxicidade do composto 2,3,7,8-PCDD (VAN DEN BERG et al., 2006).

$$TEQ = \sum_{i=1}^i TEF \times C_i \quad (2)$$

A dose letal mediana (DL50) induzida por PCDD em animais varia bastante, mesmo entre roedores. Hamsters possuem uma DL50 de 1000-5000  $\mu\text{g}$  por kg de peso corporal, enquanto os porquinhos da índia são pelo menos 1000 vezes mais sensíveis com um DL50 de 1-2  $\mu\text{g kg}^{-1}$  de peso. Para diferentes espécies de ratos a DL50 pode variar de 17,7 a 9.600  $\mu\text{g kg}^{-1}$  (WATSON et al., 2014).

### 2.7.2 Rotas de exposição às dioxinas e furanos e danos à saúde

À exceção dos desastres ambientais, dioxinas e furanos são acumulados no organismo em pequenas quantidades diárias. As emissões são distribuídas em todas as matrizes ambientais, entretanto, em razão de seu caráter lipofílico e bioacumulador, muito pouco chega aos seres humanos pela inalação ou pelo consumo de água contaminada (DOURSON et al., 2013; STORELLI et al., 2011).

Os compostos são depositados no solo e em vegetais que são consumidos por animais até alcançarem o topo da cadeia alimentar e chegam ao homem. Por isso, a principal rota de exposição humana às dioxinas consiste na alimentação, principalmente por meio da ingestão de alimentos gordurosos (GODLIAUSKIENE et al., 2012).

Um estudo de Schecter et al. (2001) mensurou a ingestão diária de 2,3,7,8-PCDD pela população americana, por meio de diferentes grupos de alimentos. Confirmando esse raciocínio, os maiores níveis foram encontrados nos laticínios e nas carnes, exceto peixes. Por estar relacionado à gorduras, a presença de PCDDs e PCDFs foram observadas em diferentes produtos de origem animal tais como ovos (OLANCA et al., 2014), leite (DESIATO et al., 2014; LU et al., 2015), carnes e peixes (LEE et al., 2016). Inclui-se aqui também o leite materno, em função da exposição da mãe à dieta baseada nesses alimentos (PAPADOPOULOU et al., 2013).

De Assunção e Pesquero (1999) levantaram dados de alguns estudos que apontam para uma participação superior a 80% para esses grupos de alimentos na dose diária ingerida por americanos. A inalação teria uma participação inferior a 5%.

Costopoulou et al. (2006) verificaram que a população grega apresentou menores quantidades de PCDDs e PCDFs (6,8 pg g<sup>-1</sup> de gordura) no soro humano (sangue) que a população de outros países europeus (14,4 a 37,7 pg g<sup>-1</sup>

de gordura), o que pode estar relacionado à uma dieta baseada no consumo de peixes (VAN DER FELLS-KLERX et al., 2014).

A contaminação por dioxinas acarreta uma série de danos à saúde dos seres vivos. A intensidade e variedade das manifestações desses efeitos estão diretamente relacionadas com o grau de exposição do organismo. Os grupos mais afetados são trabalhadores de indústrias químicas e processos de combustão, aplicadores de pesticidas e residentes de comunidades em que houveram grande contaminação, em decorrência de acidentes ambientais (PARK et al., 2009; GRANT et al., 2013).

Chen et al. (2014) caracterizaram a distribuição de PCDD/F em duas plantas de incineração: um incinerador de resíduo hospitalar e outro de resíduo industrial perigoso. O primeiro apresentou concentrações de PCDD/F significativamente superiores, tanto nas emissões medidas na chaminé quanto no ar atmosférico do local de trabalho. Essas variações foram atribuídas, principalmente, às diferenças no teor de cloro dos resíduos e às condições de combustão entre os dois empreendimentos.

Outro resultado importante foi a identificação de valores de toxicidade na fase particulada do ar atmosférico do ambiente de trabalho 11 vezes maiores que na fase gasosa. Esse fato pode estar relacionado às emissões fugitivas de gases, em razão da má condição do equipamento.

Park et al. (2009) verificaram elevados índices de PCDD/F, em TEQ, no sangue de trabalhadores de incineradores de resíduos industriais ( $41,57 \text{ pg g}^{-1}$  de gordura) e urbanos ( $9,86 \text{ pg g}^{-1}$  de gordura). Pessoas que residiam próximas (10 km) às instalações de incineração também apresentaram valores elevados de PCDD/F no sangue ( $17,64$  e  $13,31 \text{ pg g}^{-1}$  de gordura), comparadas à população controle ( $6,91 \text{ pg g}^{-1}$  de gordura).

Os riscos à saúde provocados pela contaminação por dioxinas e furanos têm sido objeto de estudo em diversos trabalhos. Mukerjee et al. (1998)

identificaram na literatura os efeitos associados à contaminação por 2,3,7,8-PCDD tais como: lesões de pele, hiperpigmentação, alterações na função do fígado e no metabolismo de lipídios, fraqueza, perda de peso, deficiência no sistema imunológico, anormalidades nos sistemas nervoso e endócrino e aumento da incidência de sarcoma e linfoma.

Sweeney e Mocarelli (2000) relataram, entre os efeitos não carcinogênicos, a cloracne, a destruição de células hepáticas, o aumento do triglicérides e alterações nos hormônios FSH e LH. Os autores também observaram uma elevada incidência de mortes por doenças cardiovasculares nos grupos de maior exposição.

Pelclová et al. (2006) descreveram outras disfunções como hepatotoxicidade, porfíria, neurotoxicidade, aterosclerose, hipertensão, diabetes e danos no sistema nervoso. Park et al. (2016) realizaram uma meta-análise com onze estudos epidemiológicos e associaram a elevação da concentração de POPs similares às dioxinas ao risco de hipertensão.

Apesar de toda a discussão sobre o câncer causado pela exposição a PCDD/F, Tuomisto e Tuomisto (2012) relatam que há mais incertezas sobre os riscos de câncer a humanos a partir da exposição às dioxinas do que é geralmente admitido. Embora seja possível que as dioxinas sejam cancerígenas a seres humanos, isso acontece em doses muito elevadas, e a validade das evidências são duvidosas. O risco de câncer quando há exposição a pequenas doses parece ser mínima ou inexistente.

### 2.7.3 Acidentes ambientais com dioxinas e furanos

Ao longo da história, o efeito nocivo das dioxinas foi evidenciado após grandes desastres ambientais: Guerra do Vietnã nos anos 60 e 70, Seveso, 1976 e Times Beach, 1982.

Nos anos 60 e início dos anos 70, aviões americanos pulverizaram grande parte do território vietnamita com o Agente Laranja, um herbicida desfolhante à base de 2,4-D e 2,4,5-T, com o intuito de descobrir o inimigo que se escondia na selva densa e prejudicar as fazendas que produziam alimento. Entretanto, esse composto estava contaminado com grandes quantidades de 2,3,7,8-PCDD. Aproximadamente 4,8 milhões de pessoas foram expostas, incluindo soldados americanos. Entre as vítimas foram relatados aumento da incidência de câncer, problemas digestivos, epidérmicos, respiratórios, além de abortos e o nascimento de crianças com má formação (PAVUK et al., 2003; TANNER et al., 2014; YOUNG et al., 2004).

Outro caso é o de Seveso, uma cidade italiana localizada ao norte de Milão. Em 10 de julho de 1976, um superaquecimento do reator de uma indústria química causou um vazamento que liberou uma nuvem de 2,3,7,8-PCDD que se espalhou rapidamente por uma área de 2,8 km<sup>2</sup>. Pássaros e outros animais começaram a morrer e, dias depois, crianças eram encaminhadas a hospitais com sintomas de diarreia, náuseas e dermatites. A área foi isolada e o solo removido foi armazenado em enormes cápsulas de concreto com tamanho comparável ao de estádios de futebol (CERLESI; DI DOMENICO; RATTI, 1989; WILSON, 1982).

A partir de então pesquisadores começaram a acompanhar, em Seveso, a manifestação dos efeitos nocivos à saúde, ao longo do tempo. Em seu estudo, Consonni et al. (2008) dividiram a região afetada em três partes de acordo com o nível de contaminação e acompanhou as causas de mortalidade num período de vinte e cinco anos. Os resultados confirmaram um aumento de neoplasias em

tecidos linfático e hematopoiético nas regiões mais afetadas. Nas mesmas regiões, o estudo apontou um aumento da mortalidade causada por doenças circulatórias, pulmonárias e também, decorrente da diabetes em mulheres.

Finalmente, podemos citar o caso de Times Beach, cidade fundada no Estado do Missouri nos Estados Unidos. Em 1972, as ruas ainda sem pavimentação geravam muita poeira e, com o intuito de amenizar o problema, Russel Bliss foi contratado para aspergir óleo nas vias. Entretanto, o transportador de resíduos utilizou um material rico em dioxinas que havia sido recolhido de uma indústria química. Quando os animais começaram a morrer e as pessoas se sentirem mal, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) coletou amostras de solo para análise. Em 1982, foi divulgada a notícia de contaminação por dioxinas e a cidade foi evacuada (YANDERS, 1986). O solo removido foi incinerado e, em 1999, o local foi reaberto como parque estadual.

Evans et al. (2000) compararam amostras de sangue de pessoas que viviam próximas ao incinerador e pessoas fora da área de exposição em três momentos distintos: antes do início da atividade, quatro meses após o início e ao término. Apesar do alto nível de contaminação do solo incinerado, não foram constatadas quantidades mensuráveis nas amostras de ambos os grupos. Entretanto, em razão da vasta gama de projetos com diferentes características, incineradores podem apresentar diferentes níveis de emissão. Domingo et al. (2015) conduziram um estudo para quantificar a exposição das populações lindeiras aos empreendimentos. As concentrações encontradas diferem sensivelmente entre as diversas instalações. Diante disso, ele evidenciou que cada caso deve ser analisado individualmente.

Outros casos são relatados na literatura internacional. Em 1999, a disposição ilegal de resíduos contendo bifenilas policloradas (PCBs) causou a contaminação de frangos e ovos na Bélgica. Ao rastrear a ração desses animais,

foram descobertos casos de contaminação em diversos países (BERNARD et al., 2002). O presidente ucraniano, Vicktor Yushchenko, foi envenenado, em 2004 e teve seu rosto desfigurado por cloracne (SORG et al., 2009). Em 2008, toneladas de carne suína tiveram que ser recolhidas na Irlanda após ser verificada uma concentração de dioxinas duzentas vezes acima do limite permitido. Novamente, o rastreamento apontou problemas na ração desses animais (MARNANE, 2012).

#### **2.7.4 Inventário de fontes e estimativas de emissão de dioxinas e furanos**

A fonte primária das dioxinas é a produção de fenóis clorados e seus derivados. Não são produzidas comercialmente, por isso são subprodutos gerados em processos industriais. Entre esses processos podemos destacar a produção de pesticidas e branqueamento de papel (KANG, 1993). Em geral, podemos identificar os processos da indústria química e os processos de incineração como as principais fontes desses compostos (ASSUNÇÃO; PESQUERO, 1999; LIU et al., 2012).

Diante dos expressivos impactos ambientais causados por esses compostos, em 1997, o Conselho Administrativo do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) convocou um Comitê Internacional de Negociações (CIN) para o estabelecimento de critérios e procedimentos que embasassem as ações contra os 12 poluentes orgânicos persistentes de uma lista conhecida como *Dirty Dozen*, entre eles as dioxinas, e a identificação de outros compostos com impactos semelhantes (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2013; UNEP, 2001).

A Convenção de Estocolmo sobre poluentes persistentes foi assinada por 92 países e União Europeia em 2001, e entrou em vigor em 2004 (MMA, 2013). Ficou determinado, na convenção, que os países deveriam desenvolver um plano de ação para reduzir ou eliminar as liberações não intencionais desses compostos e, nele, a elaboração e manutenção de inventários de fontes e estimativas de

emissões devem ser contempladas. Os inventários servem como um ponto de partida para adoção das melhores técnicas disponíveis visando à redução e eliminação de dioxinas e furanos (FIEDLER, 2007).

Em 2013, sob a batuta do Ministério do Meio Ambiente, o Brasil publicou o Inventário Nacional de Fontes e Estimativa de Emissões de Dioxinas e Furanos, como parte do Plano Nacional de Implementação da Convenção de Estocolmo (MMA, 2013).

A metodologia utilizada na elaboração do inventário brasileiro foi o *Toolkit sobre Dioxinas e Furanos – dezembro 2005 com fatores de emissão revisados em 2010*. A versão mais recente é de 2013, entretanto os fatores de emissão para incineração de resíduos permanecem inalterados. Essa metodologia foi desenvolvida pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e visa não somente a identificar as principais fontes emissoras desse poluente, como também estimar as emissões de cada atividade potencialmente poluidora (UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAM, 2013).

Na Tabela 2, estão apresentadas as estimativas de emissões de dioxinas e furanos no Brasil para o ano de 2008 (MMA, 2013).

O meio aéreo é aquele que mais recebe descargas de dioxinas e corresponde a 52,3% das emissões totais. Nessa matriz ambiental, as três atividades que mais emitem são a produção de metais ferrosos e não ferrosos, os processos de combustão não controlados e a incineração de resíduos.

Tabela 2 - Estimativas de emissões de dioxinas e furanos nas diversas matrizes ambientais no Brasil para o ano de 2008.

36

Categoria	Fonte de Emissão	Emissões anuais (g TEQ ano <sup>-1</sup> ) nos diversos meios						%
		Ar	Água	Solo	Produto	Resíduo	Total	
1	Incineração de resíduos	72,8	-	-	-	38,7	111,5	5,0
2	Produção de metais	557,4	0,4	-	-	296,8	854,6	38,2
3	Geração de calor e energia	41,6	-	-	-	11,6	53,2	2,4
4	Produção mineral	54,4	-	-	9,1	7,2	70,7	3,2
5	Transporte	8,3	-	-	-	-	8,3	0,4
6	Processos de combustão não controlados	430	-	79	-	-	509	22,8
7	Produção química e de bens de consumo	2,7	10,5	-	356,4	21,3	390,8	17,5
8	Diversos	0,9	-	-	-	2,7	3,7	0,2
9	Disposição/aterros	-	12,1	-	53,1	168	233,2	10,4
1 a 9	Total	1.168	23	79	419	546	2.235	100

Fonte: adaptado de MMA (2013).

Apesar de ser definida uma categoria apenas para incineração de resíduos, pode-se inferir que essa prática ocorre nas três categorias. Os processos de combustão não controlados englobam a queima de resíduos a céu aberto e, na categoria produção de metais ferrosos e não ferrosos, pode-se destacar a sinterização que produziu mais de 31 milhões de toneladas de sínter, em 2008, divididas igualmente em processos de alta e média reciclagem de resíduos (MMA, 2013).

Segundo UNEP (2013), os sistemas formados por incineradores e SCPAr devem ser classificados em quatro categorias, de acordo com a eficiência de remoção de dioxinas e furanos do efluente atmosférico gerado em cada empreendimento.

Cada categoria está associada a um fator de emissão específico (expressos em  $\mu\text{g Nm}^{-3}$  TEQ) que será multiplicado ao total anual produzido (expressos em toneladas) para estimar a emissão desses poluentes no meio ar. Os fatores de emissão no meio ar para incineração de resíduos sólidos de serviços de saúde (RSS) e incineração de resíduos perigosos estão apresentados na Tabela 3 e na Tabela 4, respectivamente.

Tabela 3 - Fatores de emissão no meio ar para incineradores de resíduos sólidos de serviços de saúde (RSS).

Categoria	Fator de emissão no meio ar ( $\mu\text{g t}^{-1}$ TEQ)
1 Combustão sem controle, alimentação por bateladas e nenhum SCPAr.	40.000
2 Combustão controlada, alimentação por bateladas e SCPAr mínimo ou ausente.	3.000
3 Combustão controlada, alimentação por bateladas e SCPAr bom (Precipitador Eletrostático ou Filtros Manga, preferivelmente).	525
4 Combustão controlada com emprego de tecnologia avançada, alimentação contínua e SCPAr sofisticado.	1

Fonte: Adaptado de UNEP (2013)

Tabela 4 - Fatores de emissão no meio ar para incineradores de resíduos perigosos.

	Categoria	Fator de emissão no meio ar ( $\mu\text{g t}^{-1}$ TEQ)
1	Combustão sem controle, alimentação por bateladas e nenhum SCPAr.	35.000
2	Combustão controlada, alimentação por bateladas e SCPAr mínimo ou ausente.	350
3	Combustão controlada, alimentação por bateladas e SCPAr bom (Precipitador Eletrostático ou Filtros Manga, preferivelmente).	10
4	Combustão controlada com emprego de tecnologia avançada, alimentação contínua e SCPAr sofisticado.	1

Fonte: Adaptado de UNEP (2013)

Considerando a importância da atividade de incineração de resíduos nas emissões anuais de dioxinas e furanos, deve-se conhecer como esses compostos são formados durante o processo e como essas emissões podem ser evitadas ou reduzidas.

### 2.7.5 Formação de PCDD/F nos processos de tratamento térmico

O processo de tratamento térmico de resíduos por incineração constitui uma das principais atividades emissoras de PCDD/F (ZHOU et al., 2015), o entendimento dos mecanismos de formação desses compostos em tal processo é essencial para se determinar a melhor tecnologia capaz de inibir sua formação ou otimizar sua remoção dos efluentes atmosféricos gerados antes de lançá-los no ambiente.

A primeira forma de emissão de PCDD/F é decorrente da combustão incompleta dos gases, ou seja, as dioxinas e furanos contidas no resíduo não são oxidadas no processo de tratamento térmico. Isso pode acontecer quando há instabilidade em três parâmetros da combustão: tempo, temperatura e turbulência (BUEKENS; HUANG, 1998).

Existem outros dois mecanismos que explicam a formação desses poluentes em processos de incineração.

O primeiro mecanismo é conhecido como síntese por precursores e ocorre numa faixa de temperatura entre 300-800°C. Essa reação acontece em uma fase gasosa homogênea, em razão da presença de precursores. Entre as substâncias precursoras estão os clorobenzenos, fenóis e bifenilas policloradas (PCBs) (CABRITA, 2003).

O segundo mecanismo é conhecido como síntese *de novo*. Nesse mecanismo, que ocorre em temperaturas entre 200 e 600°C (GODINHO et al., 2009), diversos materiais como produtos do petróleo, PVC, celulose, coque, carvão, carbono particulado e HCl, fornecem os elementos básicos para a formação de dioxinas e furanos. Nesse caso, os átomos são rearranjados para formar compostos alifáticos que são, posteriormente, transformados em aromáticos e, finalmente, sintetizam PCDD/F na presença de catalizadores (CABRITA, 2003).

De acordo com a teoria, postulada por Griffin (1986), a reação acontece na superfície das cinzas volantes, presentes numa mistura heterogênea sólido-gás. Nesse mecanismo, o gás Cl<sub>2</sub> é o responsável pela cloração de compostos aromáticos e é obtido, por meio da reação Deacon (equação 3), onde cloretos inorgânicos, como HCl e NaCl, sofrem ação catalisadora de cloretos metálicos, como CuCl<sub>2</sub> e FeCl<sub>3</sub>, e, na presença de oxigênio, produzem Cl<sub>2</sub>.



A reação Deacon é favorecida pela redução de temperatura, aumento da concentração de oxigênio e redução de vapor de água. Em contraste, vale ressaltar que o cobre pode apresentar um papel dualístico. Ao mesmo tempo em que favorece a formação de cloro elementar pela reação de Deacon na pós-

combustão, o aumento do teor de cobre nos resíduos também reduz a emissão de CO na combustão, demonstrando seu papel de catalizador da oxidação dos gases e contribuindo para uma combustão completa (HATANAKA; KITAJIMA; TAKEUCHI, 2004).

Em seu experimento, Milligan e Altwicker (1993) identificaram a faixa entre 300-325°C como temperatura ótima de formação de PCDD/F.

Godinho et al. (2009) identificaram que 95% das dioxinas foram encontradas na fase particulada. Esse fato não só evidencia a predominância da síntese *de novo* em relação ao mecanismo de formação, por meio de precursores na incineração de resíduos, como também aponta para as tecnologias de remoção de material particulado como grandes inibidoras das emissões de dioxinas e furanos nesses processos.

Entender os mecanismos e as condições de formação de PCDD/F é fundamental para o desenvolvimento das melhores técnicas e tecnologias capazes de reduzir as emissões desses compostos.

### **2.7.6 Tecnologias para a redução das emissões de PCDD/F**

Em razão da natureza complexa da formação de dioxinas e furanos e levando-se em conta que esses compostos podem ser formados em múltiplos estágios do processo, Buekens e Huang (1998) fizeram uma revisão extensiva da literatura e classificaram as principais técnicas existentes em cinco categorias de acordo com a abordagem utilizada: remoção de PCDD/F em gases de combustão; tratamento de cinzas volantes para a destruição de PCDD/F; prevenção da formação de PCDD/F na zona de pós-combustão dos incineradores; medidas de combustão para reduzir a formação de PCDD/F; controle da composição e propriedades dos resíduos incinerados.

Como o presente estudo leva em consideração somente as emissões na atmosfera, apenas quatro dessas categorias serão apresentadas.

### ***Composição dos resíduos***

Algumas práticas se baseiam no controle sobre a composição e as propriedades dos resíduos. As técnicas que se baseiam nesse conceito, visam à identificação e separação de materiais que contenham precursores das dioxinas. O PVC, por exemplo, é um material que possui cloro em sua composição e possui relação direta com a formação de PCDD/F (GIUGLIANO; CERNUSCHI; GHEZZ, 1989). A participação do PVC na composição gravimétrica média de resíduos sólidos urbanos não é significativa a ponto de se obter uma redução importante nas emissões desses poluentes (PENNAFORT JÚNIOR; SILVA; DEUS, 2013). Entretanto, a formação de dioxinas a partir de PVC existente nos resíduos é evidente (YAN et al., 2012).

Não é possível separar materiais ricos em precursores dos RSS e RI, uma vez que esses materiais apresentam periculosidade. A segregação desse tipo de resíduo envolve riscos ocupacionais de exposição a patógenos, materiais tóxicos, inflamáveis e corrosivos, que podem oferecer riscos mais adversos que o risco de incineração do mesmo. Além disso, esse material segregado ainda deverá ter uma destinação adequada.

### ***Combustão Completa***

Outra abordagem utilizada é garantir as melhores condições para uma combustão completa dos gases, impedindo que precursores orgânicos alcancem a zona de pós-combustão.

A estabilidade do processo é essencial para o controle de emissões de PCDD/F. Segundo Hasselriis e Dean (1998), a formação de PCDD/F em processos de combustão está estreitamente relacionada aos níveis de monóxido de carbono, oxigênio, umidade e temperatura de combustão; assim, condições ótimas de combustão podem ser atingidas e mantidas por meio do controle dessas variáveis.

Os fatores mais importantes são temperatura, tempo de residência e turbulência. A destruição dessas substâncias pode ser obtida, submetendo-se os gases a uma temperatura de 850°C por um período de 2 segundos, ou 1.000°C associado a um tempo de residência de 1 segundo (LIU et al., 2012). De acordo com MCKAY (2002), a turbulência recomendada na câmara de combustão deve ser caracterizada por um número de Reynolds igual a 10.000; entretanto, sistemas mais eficientes podem ter número de Reynolds superior a 50.000.

Interrupções do processo com variação desses três parâmetros podem levar a altas emissões de PCDD/F. Wang et al. (2007) obtiveram dados em seu estudo que demonstram a importância de se manter a estabilidade da combustão. Durante a inicialização do incinerador de resíduos analisado pelos autores, as emissões atingiram 96,9 ng Nm<sup>-3</sup> TEQ e, mesmo 18 horas após a injeção de carbono ativado, as emissões ainda apresentavam valores 40 vezes acima do limite estabelecido pela legislação do país. O tempo entre uma intervenção no processo e o efeito resultante dessa intervenção é denominado efeito de memória. Incineradores que possuem sistema de alimentação contínua e extrator de cinzas permitem maior estabilidade no processo e, portanto, favorecem a redução de PCDD/F.

O pré - tratamento do resíduo por trituração pode favorecer uma melhor combustão do material. Ao ser triturado, o resíduo se torna mais homogêneo e facilita o movimento turbulento. Isso melhora a combustão e reduz o tempo necessário.

### ***Remoção de PCDD/F***

Outra forma de mitigar a emissão de dioxinas e furanos é a remoção desses compostos do efluente gerado na combustão. Entre as técnicas estão incluídas a remoção por meio de um sistema composto por lavadores de gases, injeção de adsorvente e filtro manga; ou Redução Catalítica Seletiva.

A injeção de um adsorvente é, possivelmente, o método com menor custo de implantação. Esse dispositivo pode ser facilmente adaptado a um sistema já existente. Nesse método, as dioxinas são capturadas em um material com alta área de superfície específica. Sua eficiência é potencializada quando a injeção ocorre em etapa anterior a um filtro de tecido como os filtros manga, pois confere um tempo adicional de contato para a adsorção. A quantidade do adsorvente a ser utilizada também é menor nesse caso (HARTENSTEIN; LICATA, 2008).

A temperatura é um fator limitante para a utilização do método de injeção de carbono ativado. Esta deve ser mantida abaixo de 200°C. Além de ter sua capacidade de adsorção reduzida em temperaturas superiores, existe o risco ignição do material utilizado que é à base de carbono ativado. Em seu experimento, Atkinson et al. (2015) testaram a eficiência de carbono ativado tratados com hidrogênio, oxigênio, bromo, nitrogênio e enxofre. Com exceção do adsorvente tratado com hidrogênio, todos apresentaram uma eficiência de remoção em TEQ de 99%. A maior desvantagem é que o material filtrado ainda contém grandes quantidades de PCDD/F.

O reator de carbono ativado utiliza coque granulado como adsorvente. O grão desse material é cerca de vinte vezes maior do que quando em pó. Os reatores desse método são arranjados em módulos. Cada módulo possui camas ou bandejas que armazenam o adsorvente. A adsorção ocorre quando efluente atravessa esse sistema. O tempo de residência dos gases nesse dispositivo varia entre 5 e 10 segundos. Quando a capacidade do adsorvente é exaurida, um dispositivo o transporta para a câmara de combustão para a destruição dos poluentes que foram adsorvidos por ele (LIU et al., 2012).

Chi e Chang (2005) conduziram um experimento, no qual mediram as concentrações de PCDD/F na fase particulada e na fase vapor do efluente à jusante dois métodos distintos. No sistema que utilizava injeção de carbono

ativado seguido de filtro-manga, mais de 90% desses compostos se encontravam na fase vapor, enquanto no sistema que utilizava um reator de carbono ativado (ACR) o efluente continha a maior parte dessas substâncias na fase sólida (mais de 60%).

Guo et al. (2016) avaliaram a capacidade de adsorção da dioxina e carvão ativado e concluíram que esta pode ser da ordem de 600 mg de dioxina por grama de carvão, mostrando que a dioxina é muito mais facilmente adsorvida em carvão ativado quando comparada a outros gases orgânicos convencionais.

A tecnologia de Redução Catalítica Seletiva (SCR) possui duas grandes vantagens sobre a adsorção. Além de não gerar resíduos perigosos, o catalisador não é consumido no processo. Os principais produtos gerados são HCl e CO<sub>2</sub>. Nesse sistema, o reator possui uma estrutura alveolar por onde os gases atravessam e entram em contato com a superfície do catalisador. Os materiais mais empregados são óxidos de Titânio, Vanádio e Tungstênio (HARTENSTEIN; LICATA, 2008). Na incineração de resíduos, esse dispositivo é instalado no final do sistema de tratamento dos gases, à jusante dos lavadores e filtro-manga, já que os metais pesados reduzem a capacidade de catálise desses materiais. Entretanto, como nesse estágio a temperatura do efluente, em geral, encontra-se abaixo de 150°C, os gases devem ser reaquecidos até 300°C para otimizar a eficiência dos catalizadores (LIU et al., 2012).

#### ***Inibição da formação de PCDD/F na zona de pós-combustão***

A inibição da formação de PCDD/F após a combustão pode ser feita de algumas formas, entre elas o resfriamento dos gases de combustão, a remoção de material particulado, e a adição de inibidores.

A temperatura é um fator de grande influência na formação de dioxinas e furanos. Dessa forma, pode-se inibir a geração dessas substâncias quando o

efluente é resfriado rapidamente a uma temperatura inferior a faixa de formação pela síntese *de novo* (200 °C). Ghorishi e Altwicker (1995) compararam os níveis de PCDD/F na zona de pós-combustão em dois cenários. A concentração medida em um efluente a 430°C, após ser resfriado a 390°C, foi de 122,5  $\eta\text{g Nm}^{-3}$ . Já quando a queda de temperatura foi de 430°C para 125°C, a concentração medida foi de 30,9  $\eta\text{g Nm}^{-3}$ . Segundo Aurell, Jansson e Marklund (2009), o tempo de resfriamento também influencia no perfil de congêneres formados, o que pode causar variações na toxicidade equivalente da mistura.

Esse método pode se tornar inviável, em razão da dificuldade de obter uma variação de temperatura tão brusca quando se lida com volumes expressivos de efluentes a serem tratados. Além disso, esse procedimento compromete o aproveitamento de energia térmica em sistemas projetados para essa finalidade.

Outro elemento que contribui para a formação de PCDD/F é a presença de catalisadores nas cinzas volantes. Sendo assim, pesquisadores acreditam que a remoção de material particulado quando a temperatura ainda está elevada na zona de pós-combustão pode prevenir a formação desses compostos. Entretanto, estudos de laboratório, que utilizaram ciclone ou a associação desse dispositivo com um filtro, não observaram redução nos níveis de concentração (BUEKENS; HUANG, 1998).

Sabe-se que a temperatura no trocador de calor somada à disponibilidade de carbono residual constitui condição propícia à formação de PCDD/F. Sendo assim, alguns sistemas possuem um soprador de fuligem a ar comprimido ou jato de água para limpar, periodicamente, a superfície interna do dispositivo a fim de eliminar o suprimento de carbono necessário à reação indesejada. Porém, estudos mostraram que essa prática favoreceu o aumento de material particulado e da concentração de PCDD/F no efluente (LIU et al., 2012).

As técnicas mais bem-sucedidas que utilizam o princípio da prevenção envolvem a adição de compostos inibidores.

Uma abordagem eficaz para a inibição da formação de PCDD/F é a adição de compostos à base de enxofre e nitrogênio ao efluente gerado pela combustão. Essa prática tem como princípio evitar a formação de cloro elementar pela reação de Deacon. Chang, Cheng e Chi (2006) realizaram um estudo em laboratório e concluíram que essa substância se liga aos catalizadores à base de cobre e dificulta a reação de Deacon, reduzindo, consideravelmente, a produção de  $\text{Cl}_2$ . Entretanto, a redução da formação de dioxinas e furanos atingiu o maior percentual quando a proporção S/Cl foi igual a 2, já que o excesso de enxofre aumenta a formação de particulado e, conseqüentemente, a formação de PCDD/F.

Fu et al. (2015) estudaram a ação de 3 compostos na supressão de dioxinas e furanos quando aplicados na zona de pós-combustão: Tiosulfato de amônia, ácido amino sulfônico e thiourea. Os resultados foram promissores, especialmente para thiourea que atingiu uma eficiência de remoção em toxicidade equivalente de 99,8% em uma proporção de (S+N)/Cl igual a apenas 0,47.

Os efeitos da adição de compostos à base de S e N na redução das emissões de PCDD foram estudados por Samaras et al. (2000). Os autores conduziram experimentos em escala laboratorial adicionando compostos, contendo S e N em suas composições, ao resíduo antes que o material fosse introduzido na câmara de combustão. A proporção dos aditivos foi de 10% em peso. Os compostos inorgânicos à base de enxofre resultaram em uma redução de formação de PCDD/F de 98%, ao passo que a ureia reduziu em apenas 28%. Um resultado interessante foi a redução em 96% quando utilizada uma mistura de resíduos, contendo 1%, em peso, de ácido amino sulfônico. Diante disso, os

autores indicaram a reação entre S e N como a provável responsável pela eficiência do método.

Fujimori, Fujjinaga e Takaoka (2010) comprovaram em seu estudo que a adição de compostos alcalinos, como NaOH, Ca(OH)<sub>2</sub> e NaHCO<sub>3</sub>, em zonas de pós-combustão são capazes de desativar os cloretos metálicos, evitando assim a formação de Cl<sub>2</sub> pela reação de Deacon e, conseqüentemente, a cloração de compostos aromáticos que geram PCDD/F. Em seu experimento, o melhor desempenho foi do composto NaOH que mostrou grande reatividade, formando NaCl e óxidos metálicos, considerados inofensivos ao meio ambiente, em detrimento da formação de Cl<sub>2</sub>.



### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Identificação dos incineradores instalados em Minas Gerais**

O primeiro passo para estimar as emissões de dioxinas e furanos provenientes da incineração de resíduos de serviços de saúde (RSS) em Minas Gerais foi identificar os empreendimentos que incineram resíduos perigosos no estado.

Como toda atividade de incineração em Minas Gerais é condicionada ao licenciamento ambiental, buscou-se os processos de licenciamento ambiental de incineradores disponíveis no sitio eletrônico do Sistema Integrado de Meio Ambiente (SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2015). A Incineração de resíduos é uma atividade classificada pelo Conselho de Políticas Ambientais (COPAM) sob o código F-05-13-4, conforme a deliberação normativa nº 74, de 09 de setembro de 2004. Utilizando o SIAM, uma lista de todos os empreendimentos incineradores em Minas Gerais foi emitida em julho de 2015.

#### **3.2 Coleta de dados**

Os dados para estimar as emissões de dioxinas e furanos foram coletados por meio de vista dos processos de licenciamento ambiental em cinco unidades da Superintendência Regional de Meio Ambiente (SUPRAM): Central Metropolitana (Belo Horizonte), Norte de Minas (Montes Claros), Leste (Governador Valadares), Alto São Francisco (Divinópolis) e Sul de Minas (Varginha).

Avaliou-se para cada empreendimento, o Plano do Teste de Queima (PTQ). Esse documento deve compor obrigatoriamente o processo de licenciamento ambiental no estado de Minas Gerais. No PTQ devem estar descritos: a caracterização do incinerador, fluxograma do processo, perfil de temperaturas do sistema, descrição dos equipamentos do sistema de queima,

descrição dos resíduos e taxas de alimentação, os sistemas de controle de poluição do ar (SCPAr), seus equipamentos e suas condições operacionais (CONAMA, 2002).

### 3.3 Descrição da metodologia UNEP (2013) e classificação dos empreendimentos quanto às emissões atmosféricas de PCDD/F

De acordo com a metodologia UNEP (2013), os sistemas formados por incineradores e SCPAr, que tratam RSS e RI, podem ser classificados em quatro classes, que estão apresentadas de forma resumida na Tabela 5.

Tabela 5 - Resumo das características dos incineradores e dos sistemas de controle de poluentes atmosféricos (SCPAr) de acordo com a classificação estabelecida pela metodologia UNEP (2013).

Classe	Características do incinerador	Características do SCPAr
1	Incineradores pequenos, com um compartimento, e regime intermitente	Sem controle
2	Incineradores de regime intermitente	Controle mínimo
3	Incineradores possuem combustão controlada, de regime contínuo ou intermitente	Precipitador eletrostático ou filtro manga
4	Incineradores grandes combustão controlada	Com emissões inferiores a 0,1 $\mu\text{g Nm}^{-3}$ TEQ

Fonte: Adaptado de UNEP (2013)

Parte dos empreendimentos que incineram resíduos, levantada no presente trabalho, também incinera resíduos industriais perigosos, além dos resíduos de serviços de saúde. A classificação dos incineradores industriais pela metodologia UNEP (2013), segue os mesmos critérios apresentados na Tabela 5.

Para estabelecer as estimativas das emissões de dioxinas e furanos pelos incineradores de resíduos no estado de Minas Gerais foram utilizados fatores de emissão, que dependem do tipo de incinerador e dos SCPAr. A estimativa (E) é calculada pelo somatório das quantidades incineradas Q (em t) de cada

empreendimento, multiplicadas pelo fator de emissão  $F_E$ , (em  $\mu\text{g t}^{-1}$  TEQ), que são determinados para cada sistema de incineração (Equação 4).

$$E = \sum_{i=1}^n Q \times F_E \quad (4)$$

Nesse caso, existem diferentes fatores de emissão de dioxinas e furanos para cada tipo de resíduo incinerado conforme metodologia UNEP (2013) e apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Fatores de emissão no meio ar para incineradores de resíduos perigosos (RP) e resíduos de serviços de saúde (RSS), em função do sistema de incineração e do sistema de controle de poluentes atmosféricos (SCPAr), estabelecidos pela metodologia UNEP (2013).

Classe	Categoria	Fatores de Emissão no meio ar ( $\mu\text{g t}^{-1}$ TEQ)	
		RP	RSS
1	Combustão sem controle, alimentação por batelada e nenhum SCPAr	35.000	40.000
2	Combustão controlada, alimentação por bateladas, e SCPAr mínimo ou ausente	350	3.000
3	Combustão controlada, alimentação por batelada e SCPAr bom	10	525
4	Combustão controlada com emprego de tecnologia avançada, alimentação contínua e SCPAr sofisticado	1	1

Fonte: Adaptado de UNEP (2013)

### **3.4 Obtenção das quantidades de resíduos perigosos incinerados**

A obtenção das quantidades de resíduos incinerados por cada empreendimento no ano de 2015 foi estimada, por meio da capacidade operacional dos empreendimentos no lugar da capacidade instalada, ou seja, os incineradores não operam 24 horas por dia. Alguns incineradores funcionam em regime de apenas dois turnos (16 h d<sup>-1</sup>), e um fica inativo nos fins de semana. Esse tempo ocioso não foi contabilizado. O tempo de extração manual das cinzas também foi excluído (quando existente) do cálculo do volume de resíduos perigosos tratados nos oito empreendimentos avaliados em Minas Gerais.

Sendo assim, apesar de ainda existir uma margem entre capacidade instalada e capacidade operacional que permitiria uma expansão imediata da produção em casos de aumento da demanda, esse potencial não foi incluído no cálculo.

Como os resíduos dos serviços de saúde (RSS) e os resíduos industriais (RI) são incinerados no mesmo equipamento, é feita uma mistura entre esses resíduos, pois, geralmente, os RI possuem maior poder calorífico e menor umidade que os RSS. Essa mistura busca, portanto, favorecer a combustão. Como apenas um empreendimento especificou as quantidades exatas de cada tipo de resíduo incinerado em seu PTQ, esse estudo analisou três cenários distintos. No primeiro cenário, considerou-se que os resíduos incinerados eram compostos por 75% de RSS e 25% de RI. No segundo cenário, a composição foi de 50% de cada tipo (RI e RSS) e para o terceiro cenário utilizaram-se 25% de RSS e 75% de RI.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Identificação dos incineradores**

Quando buscado no Sistema Integrado de Meio Ambiente (SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2015) sobre a existência de incineradores em Minas Gerais, foram observadas 38 ocorrências. Entretanto, somente 13 empreendimentos possuíam licença de operação em vigor. Apesar de um percentual baixo de unidades em operação, quando comparado ao número de ocorrências, observou-se que mais quatro unidades estavam em fase inicial de licenciamento ( $L_p$ ) ou em fase de instalação ( $L_i$ ), e que duas estavam quase em processo de operação ( $L_o$  em processo). Isso mostra a expansão da atividade no estado e um potencial aumento das emissões de poluentes atmosféricos nos próximos anos.

Nota-se que a maioria desses empreendimentos em funcionamento encontram-se sob os cuidados da Supram Central e Metropolitana (4). Dois pertencem a Supram Sul de Minas, dois a Supram Zona da Mata, dois a Supram Triângulo Mineiro (sendo que um foi desconsiderado por ser crematório), um a Supram Alto São Francisco, um a Supram Leste Mineiro e um a Supram Norte de Minas. Nenhuma unidade opera na Supram Jequitinhonha.

No presente estudo, não foi possível ter acesso aos processos de licenciamento de incineradores da Superintendência Regional de Meio Ambiente do Triângulo Mineiro (Uberlândia) e da Zona da Mata (Ubá). Além disso, um dos processos da Regional do Sul de Minas não se encontrava no arquivo. Sendo assim, esse estudo analisou oito dos doze empreendimentos incineradores em Minas Gerais.

Com o intuito de preservar a identidade dos empreendimentos, foram atribuídas letras de A até H para a designação dos mesmos (Tabela 7).

Tabela 7 - Descrição da localização dos incineradores de resíduos com licença de operação em vigor, identificados em Minas Gerais, no ano de 2015, a partir dos dados disponibilizados no Sistema Integrado de Meio Ambiente (SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2015).

Unidade da SUPRAM	Empreendimento	Data*
Supram Norte de Minas	A	15/09/2009
Supram Central Metropolitana	B	27/03/2014
Supram Central Metropolitana	C	27/11/2009
Supram Central Metropolitana	D	15/09/2010
Supram Central Metropolitana	E	27/03/2014
Supram Leste Mineiro	F	15/05/2012
Supram Alto São Francisco	G	18/07/2013
Supram Sul de Minas	H	12/03/2013
Supram Sul de Minas		05/07/2011
Supram Triangulo Mineiro		31/03/2014
Supram Zona da Mata		28/11/2011
Supram Zona da Mata		05/09/2007

\*A data se refere à última movimentação do processo.

Fonte: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (2015)

#### 4.2 Quantidades de resíduos incinerados e regimes de produção

A quantidade de resíduos incinerados bem como o regime de produção variam entre os empreendimentos estudados. Dos empreendimentos avaliados, nota-se que a maior capacidade instalada está na região central do estado com 93% de todo o resíduo incinerado ( $90.060 \text{ t ano}^{-1}$ ), seguida pela região sul de Minas com 4% ( $3.832 \text{ t ano}^{-1}$ ).

A maioria dos empreendimentos incineram, de forma conjunta, os resíduos dos serviços de saúde com os resíduos industriais. Apenas o empreendimento D faz registro em separado da incineração de tais tipos de resíduos. Esse é também o único empreendimento que incinera areia de fundição.

Os empreendimentos D e H operam em 3 turnos diários, totalizando 24 horas por dia. Já os empreendimentos A, E e G operam em 2 turnos diários ou 16 horas por dia. O empreendimento F informou em seu PTQ que opera 49 horas por semana e os empreendimentos B e C apenas informaram a quantidade diária de resíduos incinerados.

Dessa forma, foi possível estabelecer as quantidades de resíduos incinerados numa base anual, conforme mostra a Tabela 8.

Tabela 8 - Quantidade de resíduos incinerados pelos empreendimentos licenciados no estado de Minas Gerais em 2015.

Empreendimentos	SUPRAM	Regime de produção	Quantidade resíduos tratados					
		h d <sup>-1</sup>	RSS (t d <sup>-1</sup> )	RI/solos (t d <sup>-1</sup> )	Areia fundição (kg d <sup>-1</sup> )	t d <sup>-1</sup>	t ano <sup>-1</sup>	
A	NORTE	16		2,20			2,20	803,00
B	CENTRAL			5,28			5,28	1.927,20
C	CENTRAL			6,24			6,24	2.277,60
D	CENTRAL	24	12,00	88,00	132,00	232,00		83.520,00
E	CENTRAL	16		6,40			6,40	2.336,00
F	LESTE	49*		2,80			2,80	1.022,00
G	ALTO S. FRANCISCO	16		3,20			3,20	1.168,00
H	SUL	24		10,50			10,50	3.832,50
Total							268,62	96.886,30

\* horas por semana; RSS - Resíduos sólidos de serviços de saúde; RI – Resíduos industriais.

Fonte: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (2015)

### 4.3 Caracterização e classificação dos incineradores e SCPAr

A caracterização dos incineradores e dos SCPAr foi obtida a partir do plano de teste de queima. Na tabela 9, mostra-se a compilação desses dados.

Comparando as informações da Tabela 9 com a classificação descrita pela metodologia (Tabela 5), os oito empreendimentos analisados podem ser classificados como Classe 2. O documento de referência da União Europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2006) sobre as melhores técnicas disponíveis para a incineração de resíduos perigosos possui extensa informação sobre o tema e contribuiu no embasamento da classificação nesse estudo.

Todos os empreendimentos atenderam aos critérios para estarem na condição classe 2; entretanto, nenhum empreendimento atendeu aos critérios da Classe 3. A falta de pré-tratamento dos resíduos antes de serem incinerados é um problema. Os resíduos vêm embalados e agrupados dentro dos recipientes. A área superficial para a gaseificação é pequena podendo formar núcleos ainda ricos em carbono orgânico entre as cinzas, favorecendo a formação de PCDD/Fs (LIU et al., 2012).

No incinerador vertical, a cada batelada os resíduos caem sobre uma grelha onde o resíduo é incinerado. Essas perturbações constantes aumentam a emissão de cinzas volantes nos gases da combustão, favorecendo a formação de PCDD/Fs (GRIFFIN, 1986). O tipo de grelha utilizado não favorece a entrada homogênea de comburente por entre os espaços dos resíduos.

A extração manual de cinzas exige que a temperatura da câmara de gaseificação seja reduzida por aproximadamente 1 hora, permitindo o acesso do operador ao cinzeiro. Essa redução de temperatura estimula a formação de PCDD/F que são adsorvidos nos dispositivos instalados à jusante do processo. Esse é o fator causal do efeito memória, responsável pela formação de PCDD/Fs, como evidenciado por Lothgren e Van Bavel (2005).

A posição da grelha e o teor de oxigênio nas câmaras são ajustados manualmente pelo operador. Nesse caso, há maior probabilidade de oscilação na concentração de oxigênio. A falta de oxigênio pode causar combustão incompleta e o excesso pode favorecer a formação de gás  $\text{Cl}_2$  e, posteriormente, PCDD/Fs (CABRITA, 2003; GODINHO et al., 2009). Quanto ao ajuste manual da grelha, movimentos bruscos podem aumentar a emissão de material particulado, enquanto falta de movimento pode gerar a combustão incompleta dos resíduos.

Os SCPAr dos empreendimentos são mínimos e não possuem precipitador eletrostático, filtros de manga, reator de adsorção, injeção de carbono ativado, reator de redução catalítica seletiva (SCR) ou adição de compostos inibidores na zona de pós combustão. Lavadores de gás são eficazes para alguns poluentes ( $\text{HCl}$ ,  $\text{SO}_x$ , metais pesados) e ajudam na remoção de PCDD/Fs, mas não são suficientes (GUERRIERO et al., 2009; LIU et al., 2012).

Tabela 9 - Caracterização dos incineradores e dos sistemas de controle de poluição do ar (SCPAr) dos incineradores licenciados do estado de Minas Gerais.

Empreendimentos	Incinerador				Sistema tratamento dos gases				
	Fab. / Modelo	Forno	Alimentação	Remoção cinzas	Sistemas de Controle da Poluição do Ar (SCPAr)				
A	-	Vertical	Batelada	Manual	Resfriador	Lavador de gases tipo venturi	-	-	-
B	-	Vertical	Batelada	Manual	Resfriador	-	-	-	-
C	Luftech RGL 200 / RGL 600	Vertical	Batelada	Manual	Resfriador	Lavador de gases tipo venturi	-	-	-
D	-	Rotativo	Contínua	Automático	Resfriador	Lavador de gases tipo venturi	-	-	-
E	Incol Incineration - Techtrol	Vertical	Batelada	Automático	Resfriador	Lavador de gases tipo venturi	Torre scrubber	-	-
F	RISAM	Vertical	Batelada	Manual	Resfriador	Lavador de gases tipo venturi	Demister	Decanter	-
G	-	Vertical	Batelada	Manual	Resfriador	Ciclone	Lavador de gases tipo venturi (alcalino)	Lavador de gases tipo venturi (água)	-
H	Luftech	Vertical	Batelada	Manual	Resfriador	Lavador de gases tipo venturi	Lavador de gases semi-seco	Filtro manga (4,2 t d <sup>-1</sup> )	-

Fonte: Dados do autor (2016)

#### 4.4 Estimativa das emissões de PCDD/F

Como apenas o empreendimento D especificou as quantidades exatas de cada tipo de resíduo incinerado, foram estabelecidos três cenários para diferentes proporções de RSS e RI na mistura dos resíduos incinerados para os outros sete empreendimentos.

Na Tabela 10, estão apresentados os valores estimados das emissões de PDCC/Fs para cada empreendimento, considerando que os empreendimentos A, B, C, E, F, G e H incineram 50% de RSS e 50% de RI.

Tabela 10 – Estimativa das emissões de PCDD/Fs provenientes de oito plantas de tratamento térmico de resíduos por incineração no estado de Minas Gerais em 2015.

Empreendimentos	Resíduos (t ano <sup>-1</sup> )	Aplicação fator RSS (3.000 µg t <sup>-1</sup> TEQ)	Aplicação de fator RI (350 µg t <sup>-1</sup> TEQ)	Totais em 2015 (g t <sup>-1</sup> TEQ)
A	803	1.204.500	140.525	1,35
B	1.927	2.890.800	337.260	3,23
C	2.278	3.416.400	398.580	3,81
D	83.520	12.960.000	27.720.000	40,68
E	2.336	3.504.000	408.800	3,91
F	1.022	1.533.000	178.850	1,71
G	1.168	1.752.000	204.400	1,96
H	3.833	5.748.750	670.688	6,42
<b>Total</b>	<b>96.886</b>			<b>63,07</b>

Fonte: Dados do autor (2016)

Num segundo cenário, onde os sete empreendimentos supracitados incineram 75% de RSS e 25% de RI, as emissões totais de PCDD/F em 2015 chegariam a 71,92 g t<sup>-1</sup> TEQ. Enquanto no terceiro cenário, onde tais empreendimentos incineram 25% de RSS e 75% de RI, as emissões totais seriam iguais a 54,21 g t<sup>-1</sup> TEQ.

De acordo com o MMA (2013), a categoria 1 (incineração de resíduos) foi responsável pela emissão de 72,8 g TEQ no meio ar, no Brasil, em 2008.

Desse total, 68,1 g TEQ foram emitidos pela incineração de RI e RSS (subcategorias 1-b e 1-c, respectivamente). O estado de Minas Gerais possuía 3 empreendimentos incineradores e contribuiu com aproximadamente 9,2% das emissões nacionais de PCDD/F (6,27 g TEQ), no meio ar, provenientes da incineração de resíduos.

Em contraste, o presente trabalho mostrou que havia doze empreendimentos incinerando resíduos perigosos, no estado de Minas Gerais, em 2015. Verificou-se que a capacidade operacional das oito plantas de tratamento, analisadas nesse estudo, foi de 96.886 t ano<sup>-1</sup> de RSS e RI. As estimativas mostraram que, juntas, as plantas possuem um potencial de emissão de até 71,92 g ano<sup>-1</sup> TEQ de dioxinas e furanos na atmosfera (cenário 3). Esse valor é aproximadamente 11,5 vezes maior do que os 6,27 g TEQ que foram emitidos no estado em 2008. A explicação para essa variação pode ser explicada por diferentes razões.

Primeiramente, a fonte dos dados utilizados nas estimativas (2008 e 2015) não foi a mesma. O inventário publicado pelo MMA (2013) utilizou dados não oficiais, como aqueles fornecidos por associações de empresas. Utilizaram-se 80% da capacidade instalada de incineração de resíduos perigosos, segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos, no Brasi, em 2008, publicado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Essas estimativas foram feitas, considerando-se que 94.404 t de RSS e RI foram incinerados em todo território nacional em 2008.

Já, o presente trabalho utilizou dados oficiais dos processos de licenciamento ambiental dos empreendimentos. A quantidade de RI e RSS, tratados nos oito empreendimentos em Minas Gerais, em 2015, foi de 96.886 t.

A segunda razão para o aumento das emissões é o aumento do número de empreendimentos que incineram resíduos perigosos no estado. Esse número

quadruplicou nos últimos sete anos e ainda existem outros que não estão operando, mas estão em processo de licenciamento.

Possivelmente, esse aumento está relacionado com a promulgação da lei 12.305 de 2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos. A lei 12.305/2010 prevê pontos muito importantes nesse contexto, como a redução da periculosidade dos resíduos, a destinação adequada desses materiais e a responsabilidade compartilhada. Isso proporcionou um aumento da demanda por empreendimentos especializados no tratamento e destinação adequada de resíduos perigosos, como RSS e RI.

A terceira razão é a utilização de uma tecnologia que não favorece a estabilidade da combustão e também de dispositivos e leiautes de SCPAr, que não são eficazes para manter baixas emissões de PCDD/F, durante toda a operação.

Existem diversos problemas relacionados às condições de combustão e aos métodos e dispositivos utilizados no tratamento dos gases. Esse trabalho identificou que ainda há uma grande distância entre a tecnologia utilizada em Minas Gerais e as melhores práticas de incineração de resíduos perigosos, descritas no documento de referência da União Europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2006). Dentre os problemas dos incineradores, em Minas Gerais, alguns pontos precisam ser discutidos.

A falta de um pré-tratamento dos resíduos, para homogeneizá-los antes de serem incinerados, é um problema. Os resíduos vêm embalados e agrupados dentro de sacos e recipientes. Essas porções heterogêneas dos resíduos possuem área superficial reduzida para a gaseificação. Isso faz com que o tempo de residência do resíduo precise ser aumentado, caso contrário pode haver a geração de um volume de cinzas muito superior ao de uma gaseificação homogênea.

De acordo com o documento de referência sobre as melhores práticas de incineração de resíduos perigosos (EUROPEAN COMMISSION, 2006), técnicas como a trituração dos resíduos favorecem a mistura entre combustível e comburente, e aumentam a velocidade do processo de gaseificação, bem como reduzem o volume e o teor de carbono orgânico das cinzas.

No incinerador vertical, a cada batelada os resíduos são despejados verticalmente sobre uma grelha onde o resíduo é incinerado. Essas perturbações constantes aumentam a emissão de cinzas volantes nos gases da combustão, favorecendo a formação de PCDD/Fs. Além disso, a cada batelada, existem variações nos níveis de oxigênio na câmara primária.

Um sistema de alimentação contínuo, com deposição lenta dos resíduos na câmara de gaseificação, pode reduzir a emissão de material particulado e, conseqüentemente, a formação de PCDD/F à jusante no processo. Também evitaria o problema de excesso de oxigênio na câmara. O oxigênio é essencial na combustão, entretanto ele reage com HCl na zona de pós-combustão formando gás cloro ( $\text{Cl}_2$ ). Esse gás é o responsável pela cloração dos compostos alifáticos que serão os precursores dos PCDD/F.

É por isso que a injeção de compostos à base de enxofre e nitrogênio na zona de pós-combustão é considerada uma das melhores práticas disponíveis. Esses elementos competem com o HCl na reação com o excesso de oxigênio para formar óxidos de enxofre e de nitrogênio em detrimento da formação de gás cloro. Esses óxidos ainda podem auxiliar na inibição de PCDD/F, pois impregnam a superfície das cinzas volantes onde estão contidos os catalisadores metálicos. Isso dificulta o contato dos precursores com os catalisadores (CHANG; CHENG; CHI, 2006; FU et al. 2015; EUROPEAN COMMISSION, 2006; FUJIMORI; FUJINAGA; TAKAOKA, 2010; SAMARAS et al., 2000).

A extração manual de cinzas também compromete consideravelmente a estabilidade da combustão. Ela exige que a temperatura da câmara de

gaseificação seja reduzida por aproximadamente 1 hora, permitindo o acesso do operador ao cinzeiro. Essa redução de temperatura pode atingir a faixa de formação de PCDDF, aumentando, significativamente, a síntese desses compostos, que são adsorvidos nos dispositivos instalados à jusante.

Os lavadores de gás, por exemplo, contêm peças plásticas ou resinas, onde esses compostos ficam adsorvidos. Quando a temperatura aumenta ou a concentração de dioxinas e furanos nos gases é reduzida, esses poluentes são desorvidos para o efluente atmosférico, causando o efeito memória, provavelmente um dos maiores responsáveis pelas altas emissões nesse tipo de incinerador (LOTHGREN; VAN BAVEL, 2005).

Ajustes manuais da posição da grelha e das válvulas de injeção de oxigênio são outros pontos negativos. No caso da injeção do comburente, há maior probabilidade de oscilação na concentração de oxigênio. A falta de oxigênio pode causar combustão incompleta e o excesso pode favorecer a formação de gás  $\text{Cl}_2$  e, posteriormente, PCDD/Fs. Quanto ao ajuste manual da grelha, um operador inexperiente pode contribuir para aumentar a emissão de material particulado, ao realizar movimentos bruscos, enquanto a falta de movimento pode gerar a combustão incompleta dos resíduos.

Todos os empreendimentos analisados possuem um resfriador ou trocador de calor. Resfriar os gases da combustão, de maneira brusca, inibe a formação de PCDD/F, pois diminui o tempo de residência dos gases em temperaturas que favorecem a sua formação.. Entretanto, a troca de calor deve ser suficiente para resfriar o efluente a uma taxa de 500 a 1.000  $^{\circ}\text{C s}^{-1}$  (BUEKENS; HUANG, 1998), e isso se torna um desafio em condições de operação intensa.

Lavadores de gases também estão presentes em 100% dos empreendimentos analisados. Esses dispositivos são eficazes para remover alguns poluentes, como metais, óxidos de nitrogênio - $\text{NO}_x$  e óxidos de enxofre -

SOx, e ajudam na remoção de PCDD/F, mas não são suficientes para reduzir as emissões de tais compostos abaixo dos limites estabelecidos pela legislação, principalmente combinados com as altas emissões em processos de combustão de baixa estabilidade.

Apenas o empreendimento H utiliza filtro manga e, mesmo assim, apenas para 200 kg h<sup>-1</sup> dos 500 kg h<sup>-1</sup> de capacidade. Isso evidencia como os SCPAr dos empreendimentos são simples. Não são utilizados: precipitador eletrostático, reator de adsorção por carbono ativado, reator de redução catalítica seletiva (SCR) ou adição de compostos inibidores na zona de pós-combustão. É por isso que o empreendimento D, apesar de possuir forno rotativo e sistema de alimentação contínuo e extrator automático de cinzas não pode ser classificado como classe 3.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Diante desse cenário, é possível constatar a necessidade de investimentos em tecnologias mais condizentes com o desenvolvimento sustentável. Em Minas Gerais, as plantas de incineração de resíduos perigosos possuem baixa capacidade, comparadas com os empreendimentos europeus, que centralizam o tratamento dos resíduos. Isso faz com que o custo marginal da incineração por tonelada seja maior, o que diminui a viabilidade de investimento em sistemas mais eficazes e, conseqüentemente, mais onerosos.

Incinerar resíduos sólidos urbanos (RSU) é comum na Europa. O alto volume de resíduos tratados também favorece investimentos em tecnologias para aproveitamento da energia dos resíduos (WTE), ao passo que no estado, os RSU não são incinerados e os resíduos perigosos são tratados em doze unidades diferentes que não se beneficiam da energia desprendida. Os sistemas poderiam aplicar parte desse calor para aquecer o ar que é alimentado nas câmaras de combustão. Isso ajuda a manter a estabilidade da combustão e favorece a inibição de PCDD/F no processo.

A modernização da tecnologia de tratamento térmico de resíduos em Minas Gerais não será breve. Por isso, serão necessários novos inventários e mais frequentes. A metodologia usada neste estudo pode representar uma alternativa na elaboração dos inventários. Os sistemas de informação dos governos estaduais podem ser melhorados para usar a informação contida nos processos de licenciamento ambiental e emitir relatórios atualizados sobre a atividade de produção de alguns setores-chave como incineração, produção de metais e produção mineral.

Em um país continental como o Brasil, a elaboração de inventários de fontes e estimativas de emissão de PCDD/F pode ser morosa e trabalhosa, mas deve ser feita em intervalos mais frequentes. Os inventários orientam na

elaboração e avaliação do Plano Nacional de Implementação da Convenção de Estocolmo.

Esta pesquisa apontou para alguns caminhos possíveis. Uma linha de pesquisa poderia buscar o desenvolvimento de um sistema de tratamento por incineração que, primeiro, resolvesse a estabilidade da combustão em um equipamento para baixas capacidades de resíduo ( $10 - 20 \text{ t d}^{-1}$ ), de acordo com o perfil dos empreendimentos locais e a densidade populacional da região em que estão inseridos. E, em segundo, utilizasse um SCPAr eficaz com um custo total que não ultrapassasse um milhão de dólares.

Provavelmente, o risco de transporte de resíduos perigosos, somado às longas distâncias a serem percorridas em um país de ampla extensão territorial, favoreça a escolha de um modelo de gestão em que unidades de tratamento menores e mais bem distribuídas geograficamente sejam preferíveis às grandes unidades. Isso pode ser possível, desde que os limites máximos de emissão sejam respeitados durante todo o processo de tratamento desses resíduos.

Atualmente, os incineradores e SCPAr são avaliados quanto à sua eficiência de remoção de PCDD/F em duas ocasiões anuais. Entretanto, essa frequência pode não ser suficiente para garantir resultados confiáveis que representem a emissão média nos 365 dias do ano.

Outra linha de pesquisa é estudar as características físicas e químicas dos resíduos tratados. A composição gravimétrica pode ajudar na determinação do teor de oxigênio ideal na combustão dos gases.

Já o estudo do perfil dos congêneres bem como da concentração de PCDD/F nas fases sólida e vapor dos sistemas pode ajudar no projeto do SCPAr adequado. De acordo com Chi e Chang (2005), diferenças nos SCPAr afetam significativamente a distribuição de congêneres de dioxinas e furanos nas emissões, mas todavia não têm influência significativa na proporção de PCDD/F e bifenilas policloradas (PCBs) nas fases sólida e vapor.

## 6 CONCLUSÕES

O presente estudo mostrou que o estado de Minas Gerais não conseguiu reduzir suas emissões de PCDD/F, provenientes da incineração de resíduos perigosos. As emissões aumentaram expressivamente nos últimos sete anos, indo de encontro ao que foi preconizado na convenção de Estocolmo. Sendo assim, faz-se a necessidade de pesquisas mais aprofundadas e o emprego de recursos para o desenvolvimento de uma tecnologia sustentável que atenda as demandas da atividade.

O crescimento da incineração e das emissões dessa atividade também mostra a importância de se comparar os inventários nacionais em momentos distintos e regularmente. Outras atividades como produção de metais e produção mineral, que possuem grande participação nas emissões nacionais, podem estar em situação semelhante da incineração.

O método de amostragem para dioxinas e furanos é trabalhoso e demanda tempo, o que inviabiliza sua execução rotineira (monitoramento contínuo). Entretanto é necessário encontrar uma forma de avaliação da eficiência dos incineradores que tenha resultados mais representativos da média anual de emissões.



## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10004**: resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 77 p.
- ASSUNÇÃO, J. V. de; PESQUERO, C. R. Dioxins and furans: origins and risks. **Revista de Saúde Pública**, São Paulo, v. 33, n. 5, p. 523-530, out. 1999.
- ATKINSON, J. D. et al. Adsorption and destruction of PCDD/Fs using surface-functionalized activated carbons. **Chemosphere**, Oxford, v. 118, p. 136-142, Jan. 2015.
- AURELL, J.; JANSSON, S.; MARKLUND, S. Effects of quench time profiles on pcdd/f formation in the postcombustion zone during municipal solid waste incineration. **Environmental Engineering Science**, Larchmont, v. 26, n. 3, p. 541-550, Mar. 2009.
- BARBIERI, J. C. **Gestão ambiental empresarial**: conceitos, modelos e instrumentos. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2011. 376 p.
- BERNARD, A. et al. The Belgian PCB/dioxin incident: analysis of the food chain contamination and health risk evaluation. **Environmental Research**, New York, v. 88, n. 1, p. 1-18, Jan. 2002.
- BRASIL. Lei nº. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 3 ago. 2010.
- BUEKENS, A.; HUANG, H. Comparative evaluation of techniques for controlling the formation and emission of chlorinated dioxins/furans in municipal waste incineration. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 62, n. 1, p. 1-33, Sept. 1998.
- CABRITA, I. Formação e destruição de dioxinas em processos de combustão e co-combustão. **Revista Faculdade de Medicina de Lisboa**, Lisboa, v. 8, n. 4, p. 225-235, 2003.
- CARVALHO, M. B. F. **Poluição atmosférica e mudanças climáticas**. Rio de Janeiro: PUC, 2009. Disponível em: < [http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio\\_resumo2009/relatorio\\_dir/mariana\\_carvalho.pdf](http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2009/relatorio_dir/mariana_carvalho.pdf)>. Acesso em: 18 ago. 2016.

CERLESI, S.; DI DOMENICO, A.; RATTI, S. 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin (TCDD) persistence in the Seveso (Milan, Italy) soil. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Amsterdam, v. 18, n. 2, p. 149-164, Oct. 1989.

CERON, L.; EINLOFT, S.; LIGABUE, R. Nova tecnologia em processo de filtração de particulados de polietileno usando filtro cartucho de poli-imida aromática. **Redige**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 1, p. 1-20, 2013.

CHANG, M. B.; CHENG, Y. C.; CHI, K. H. Reducing PCDD/F formation by adding sulfur as inhibitor in waste incineration processes. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 366, n. 2-3, p. 456-465, Aug. 2006.

CHEN, T. et al. Distribution of PCDD/Fs in the fly ash and atmospheric air of two typical hazardous waste incinerators in Eastern China. **Environmental Science and Pollution Research**, Landsberg, v. 22, n. 2, p. 1207-1214, Jan. 2015.

CHEN, T. M. et al. An efficient wet electrostatic precipitator for removing nanoparticles, submicron and micron-sized particles. **Separation and Purification Technology**, Oxford, v. 136, p. 27-35, Nov. 2014.

CHI, K. H.; CHANG, M. B. Evaluation of PCDD/F congener partition in vapor/solid phases of waste incinerator flue gases. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 39, n. 20, p. 8023-8031, Oct. 2005.

COELHO, H. M. G. **Modelo para avaliação e apoio ao gerenciamento de resíduos sólidos de indústrias**. 2011. 301 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Híbridos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 316, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 224, 20 nov. 2002. Seção 1, p. 92-95.

CONSONNI, D. et al. Mortality in a population exposed to dioxin after the Seveso, Italy, accident in 1976: 25 years of follow-up. **American Journal of Epidemiology**, Baltimore, v. 167, n. 7, p. 847-858, Apr. 2008.

COSTOPOULOU, D. et al. Levels of dioxins, furans and PCBs in human serum and milk of people living in Greece. **Chemosphere**, Oxford, v. 65, n. 9, p. 1462-1469, Nov. 2006.

DESIATO, R. et al. Data on milk dioxin contamination linked with the location of fodder croplands allow to hypothesize the origin of the pollution source in an Italian valley. **The Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 499, p. 248-256, Nov. 2014.

DOMINGO, J. L. et al. Health risks for the population living in the vicinity of an integrated waste management facility: screening environmental pollutants. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 518-519, p. 363-370, June 2015.

DOURSON, M. L. et al. The importance of problem formulations in risk assessment: case study involving dioxin-contaminated soil. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, Duluth, v. 66, n. 2, p. 208-216, July 2013.

DRUMM, F. C. et al. Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 18, n. 1, p. 66-78, abr. 2014.

DU, Q. et al. The experimental study of a water-saving wet electrostatic precipitator for removing fine particles. **Journal of Electrostatics**, Amsterdam, v. 81, p. 42-47, June 2016.

EBERT, F.; BUTTNER, H. Recent investigations with nozzle scrubbers. **Powder Technology**, Lausanne, v. 86, n. 1, p. 31-36, Jan. 1996.

EUROPEAN COMMISSION - EC. **Integrated pollution prevention and control**: reference document on the best available techniques for waste incineration. [S.l.: s.n.], 2006. 469 p. Disponível em: <eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wi\_bref\_0806 .pdf>. Acesso em: 18 ago. 2016.

EUROPEAN UNION - EU. Directive 2000/76/EC: on the incineration of waste. **Official Journal of the European Communities**, Amsterdam, p. 1-21, dez. 2000.

EVANS, R. G. et al. Dioxin incinerator emissions exposure study times beach, missouri. **Chemosphere**, Oxford, v. 40, n. 9-11, p. 1063-1074, May/June 2000.

FAGUNDES et al. Caminhos para a sustentabilidade do setor de fundição no Brasil. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Ponta Grossa, v. 5, n. 2, p. 27-40, abr./jun. 2010.

FAGUNDES, A. B. **Mapeamento do gerenciamento das areias a verde de fundição no estado do Paraná sob a ótica da produção mais limpa: uma contribuição para o estabelecimento de estratégias.** 2010. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2010.

FIEDLER, H. National PCDD/PCDF Release inventories under the Stockholm Convention on persistent organic pollutants. **Chemosphere**, Oxford, v. 67, n. 9, p. 96-108, Apr. 2007.

FIORE, A. M.; NAIK, V.; LEIBENSPERGER, E. M. Air quality and climate connections. **Journal of the Air & Waste Management Association**, Pittsburgh, v. 65, n. 6, p. 645-685, June 2015.

FU, J.-Y. et al. PCDD/Fs' suppression by sulfur-amine/ammonium compounds. **Chemosphere**, Oxford, v. 123, p. 9-16, Mar. 2015.

FUJIMORI, T.; FUJINAGA, Y.; TAKAOKA, M. Deactivation of metal chlorides by alkaline compounds inhibits formation of chlorinated aromatics. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 44, n. 19, p. 7678-7684, Oct. 2010.

GHORISHI, S. B.; ALTWICKER, E. R. Formation of polychlorinated dioxins, furans, benzenes and phenols in the postcombustion region of a heterogeneous combustor: effect of bed material and postcombustion temperature. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 29, n. 5, p. 1156-1162, May 1995.

GIUGLIANO, M.; CERNUSCHI, S.; GHEZZI, U. The emission of dioxins and related compounds from the incineration of municipal solid wastes with high contents of organic chlorine (PVC). **Chemosphere**, Oxford, v. 19, n. 1-6, p. 407-411, 1989.

GODECKE, M. V.; NAIME, R. H.; FIGUEIREDO, J. A. S. O consumo e a geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 8, n. 8, p. 1700-1712, set./dez. 2012.

GODINHO, M. et al. Formation of pcdd and pcdf in thermal treatment of footwear leather wastes. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 167, n. 1-3, p. 1100-1105, Aug. 2009.

GODLIAUSKIENE, R. et al. Analysis of dioxins, furans and DL-PCBs in food and feed samples from Lithuania and estimation of human intake. **Food and Chemical Toxicology**, Oxford, v. 50, n. 11, p. 4169-4174, Nov. 2012.

GOMES, L. P.; ESTEVES, R. V. R. Análise do sistema de gerenciamento dos resíduos de serviços de saúde nos municípios da bacia hidrográfica do Rio dos Sinos, Rio Grande do Sul, Brasil. **Engenharia Sanitária Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 4, p. 377-384, out./dez. 2012.

GRANT, K. et al. Health consequences of exposure to e-waste: a systematic review. **The Lancet Global Health**, Oxford, v. 1, n. 6, p. 350-361, Dec. 2013.

GRIFFIN, R. D. A new theory of dioxin formation in municipal solid-waste combustion. **Chemosphere**, Oxford, v. 15, n. 9-12, p. 1987-1990, 1986.

GUERRIERO, E. et al. Pcd/f removal efficiency by electrostatic precipitator and wetfine scrubber in an iron ore sintering plant. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 172, n. 2-3, p. 1498-1504, Dec. 2009.

GUO, Y. et al. Modeling of dioxin adsorption on activated carbon. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 283, p. 1210-1215, Jan. 2016.

HARTENSTEIN, H.; LICATA, A. Modern technologies to reduce emissions of dioxins and furans from waste incineration. In: ANNUAL NORTH AMERICAN WASTE-TO-ENERGY CONFERENCE, 2008, Nashville. **Proceedings...** Nashville: [s.n.], 2008.

HASSELRIIS, F.; DEAN, R. B. Optimization of combustion conditions to minimize dioxin emissions. In: DEAN, R. B. (Ed.). **Incineration of municipal waste**. New York: Academic Press, 1998. p. 233-248.

HATANAKA, T.; KITAJIMA, A.; TAKEUCHI, M. Role of copper chloride in the formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans during incineration. **Chemosphere**, Oxford, v. 57, n. 1, p. 73-79, Oct. 2004.

HOOGENBOOM, R. et al. European developments following incidents with dioxins and PCBs in the food and feed chain. **Food Control**, Guildford, v. 50, p. 670-683, abr. 2015.

KANG, H. K. **Handbook of hazardous materials**. San Diego: Academic Press, 1993. 772 p.

KUROKAWA, J. et al. Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000–2008: regional emission inventory in Asia. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Essex, v. 13, p. 11019-11058, Nov. 2013.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENORIO, J. A. S. Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. **Polímeros**, São Carlos, v. 18, n. 2, p. 106-118, abr./jun. 2008.

LEE, C. et al. Temporal trend of polychlorinated dibenzo-p-dioxin / polychlorinated dibenzofuran and dioxin like-polychlorinated biphenyl concentrations in food from Taiwan markets during 2004–2012. **Journal of Food and Drug Analysis**, Amsterdam, v. 24, n. 3, p. 644-652, July 2016.

LIU, H. et al. Pollution control technologies of dioxins in municipal solid waste incinerator. **Procedia Environmental Sciences**, Oxford, v. 16, p. 661-668, 2012.

LOTHGREN, C. J.; VAN BAVEL, B. Dioxin emissions after installation of a polishing wet scrubber in a hazardous waste incineration facility. **Chemosphere**, Oxford, v. 61, n. 3, p. 405-412, Oct. 2005.

LU, D. et al. Levels of polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans (PCDD/Fs) and dioxin-like polychlorinated biphenyls (DL-PCBs) in breast milk in Shanghai, China: A temporal upward trend. **Chemosphere**, Oxford, v. 137, p. 14-24, Oct. 2015.

MALISCH, R.; KOTZ, A. Dioxins and PCBs in feed and food: review from European perspective. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 491-492, p. 2-10, Sept. 2014.

MALTHUS, T. R. **An essay on the principle of population**. London: ESP, 1798. 134 p. Disponível em: <<http://www.esp.org/books/malthus/population/malthus.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2016.

MARNANE, I. Comprehensive environmental review following the pork PCB/dioxin contamination incident in Ireland. **Journal of Environmental Monitoring**, Cambridge, v. 14, n. 10, p. 2551-2556, Oct. 2012.

MCKAY, G. Dioxin characterization, formation and minimization during municipal solid waste (MSW) incineration: review. **Chemical Engineering Journal**, New York, v. 86, n. 3, p. 343-368, Apr. 2002.

MELO, A. R. **Otimização do reuso de água em lavadores contínuos da indústria têxtil**. 2005. 219 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MILLIGAN, M. S.; ALTWICKER, E. The relationship between de-novo synthesis of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and low-temperature carbon gasification in fly-ash. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 27, n. 8, p. 1595-1601, Aug. 1993.

MINAS GERAIS. Comunicado. **SEMAD**, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <[www.siam.mg.gov.br](http://www.siam.mg.gov.br)>. Acesso em: 15 jul. 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Inventário Nacional de fontes e estimativa de emissões de dioxinas e furanos: Brasil POPs: plano nacional de implementação convenção de Estocolmo**. Brasília: MMA, 2013. 188 p.

MUKERJEE, D. et al. Health impact of polychlorinated dibenzo-p-dioxins: a critical review. **Journal of the Air & Waste Management Association**, Pittsburgh, v. 48, n. 2, p. 157-165, Feb. 1998.

OLANCA, B. et al. Polychlorinated dioxins, furans (PCDD/Fs), dioxin-like polychlorinated biphenyls (dl-PCBs) and indicator PCBs (ind-PCBs) in egg and egg products in Turkey. **Chemosphere**, Oxford, v. 94, p. 13-19, Jan. 2014.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE - OMS. **Air quality guidelines - global update 2005**. New York: WHO, 2006. Disponível em: <[http://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair/outdoorair\\_aqg/en/](http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en/)>. Acesso em: 18 ago. 2016.

OUTDOOR AIR POLLUTION. **IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: volume 109**. France: IARC, 2016. 454 p.

PAPADOPOULOU, E. et al. Maternal diet, prenatal exposure to dioxins and other persistent organic pollutants and anogenital distance in children. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 461-462, p. 222-229, Sept. 2013.

PARK, H. et al. Dioxin and dioxin-like PCB profiles in the serum of industrial and municipal waste incinerator workers in Korea. **Environment International**, New York, v. 35, n. 3, p. 580-587, Apr. 2009.

PARK, S. H. et al. Body burden of persistent organic pollutants on hypertension: a meta-analysis. **Environmental Science and Pollution Research International**, Landsberg, v. 23, n. 14, p. 14284-14293, July 2016.

PAVUK, M. et al. serum 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD) levels and thyroid function in air force veterans of the Vietnam war. **Annals of Epidemiology**, Amsterdam, v. 13, n. 5, p. 335-343, May 2013.

PELCLOVÁ, D. et al. Adverse effects in humans exposed to 2,3,7,8-tetrachlorinated dibenzo-p-dioxin (TCDD). **Reviews on Environmental Health**, Germany, v. 21, n. 2, p. 119-138, Apr./June 2006.

PENNAFORT JÚNIOR, L. C. G.; SILVA, F. R. da; DEUS, E. P. de. Avaliação e caracterização de tubos fabricados com PVC reciclado. **Polímeros**, São Carlos, v. 23, n. 4, p. 547-551, ago. 2013.

PIMENTA, H. C. D.; GOUVINHAS, R. P. A produção mais limpa como ferramenta da sustentabilidade empresarial: um estudo no estado do Rio Grande do Norte. **Production**, São Paulo, v. 22, n. 3, p. 462-476, maio/ago. 2012.

SALEEM, M. et al. Influence of operating parameters on cake formation in pilot scale pulse-jet bag filter. **Powder Technology**, Lausanne, v. 224, n. 1-2, p. 28-35, July 2012.

SAMARAS, P. et al. PCDD/F Prevention by novel inhibitors: addition of inorganic s- and n- compounds in the fuel before combustion. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 34, n. 24, p. 5092-5096, Dec. 2000.

SCHECTER, A. et al. Intake of dioxins and related compounds from food in the US population. **Journal of Toxicology and Environmental Health**, Washington, v. 63, n. 1, p. 1-18, May 2001.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Comunicado**. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/siam/login.jsp>>. Acesso em: 12 dez. 2015.

SEVERO, E. A. et al. Benefícios advindos do gerenciamento de resíduos de serviço de saúde na Serra Gaúcha (Brasil). **Production**, São Paulo, v. 33, n. 8, p. 12, 2012.

SILVA, D. F.; VON SPERLING, E.; BARROS, R. T. V. Avaliação do gerenciamento dos resíduos de serviços de saúde em municípios da região metropolitana de Belo Horizonte (Brasil). **Engenharia Sanitária Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, p. 251-262, jul./set. 2014.

SILVA, W. R. L. da et al. Influência do emprego de areia de fundição residual nas propriedades no estado fresco e endurecido de misturas cimentícias. **Revista Ibracom de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 4, n. 4, p. 642-662, out. 2011.

SORG, O. et al. 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD) poisoning in Victor Yushchenko: identification and measurement of TCDD metabolites. **The Lancet**, London, v. 374, n. 9696, p. 1179-1185, Oct. 2009.

STORELLI, M. M. et al. Polychlorinated biphenyls (PCBs), dioxins and furans (PCDD/Fs): occurrence in fishery products and dietary intake. **Food Chemistry**, London, v. 127, n. 4, p. 1648-1652, Aug. 2011.

SWEENEY, M. H.; MOCARELLI, P. Human health effects after exposure to 2,3,7,8-TCDD. **Food Additives & Contaminants**, London, v. 17, n. 4, p. 303-316, Apr. 2000.

TANNER, C. M. et al. The disease intersection of susceptibility and exposure: Chemical exposures and neurodegenerative disease risk. **Alzheimer's & Dementia**, Oxford, v. 10, n. 3, p. 213-225, June 2014.

TUOMISTO, J.; TUOMISTO, J. T. Is the fear of dioxin cancer more harmful than dioxin? **Toxicology Letters**, Amsterdam, v. 210, n. 3, p. 338-344, May 2012.

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAM - UNEP. **Stockholm convention on persistent organic pollutants**. [S.l.: s.n.], 2001. 46 p.  
Disponível em: <[www.pops.int/documents/convtext/convtext\\_en.pdf](http://www.pops.int/documents/convtext/convtext_en.pdf)>. Acesso em: 18 ago. 2016.

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAM - UNEP. **Toolkit for identification and quantification of releases of dioxins, furans and other unintentional POPs**. Stockholm: UNEP, 2013. 445 p.

VAN DEN BERG, M. et al. The 2005 World Health Organization reevaluation of human and mammalian toxic equivalency factors for dioxins and dioxin-like compounds. **Toxicological Sciences**, Orlando, v. 93, n. 2, p. 223-241, Oct. 2006.

VAN DER FELS-KLERX, H. J. et al. A framework to determine the effectiveness of dietary exposure mitigation to chemical contaminants. **Food and Chemical Toxicology**, Oxford, v. 74, p. 360-371, Dec. 2014.

VEHLOW, J. Air pollution control systems in wte units: an overview. **Waste Management**, New York, v. 37, p. 58-74, 2015.

WANG, L. C. et. al. Influence of start-up on PCDD/F emission of incinerators. **Chemosphere**, Oxford, v. 67, n. 7, p. 1346-1353, Apr. 2007.

WATSON, J. D. et al. TCDD dysregulation of 13 AHR-target genes in rat liver. **Toxicology and Applied Pharmacology**, San Diego, v. 274, n. 3, p. 445-454, Feb. 2014.

WILSON, D. C. Lessons from seveso. **Chemistry in Britain**, London, v. 18, n. 7, p. 499-504, 1982.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our common future**. New York: Oxford University Press, 1987. 400 p.

YAN, M. et al. Sludge as dioxins suppressant in hospital waste incineration. **Waste Management**, Elmsford, v. 32, n. 7, p. 1453-1458, July 2012.

YANDERS, A. F. The Missouri dioxin episode. **Chemosphere**, Oxford, v. 15, n. 9-12, p. 1571-1576, 1986.

YOUNG, A. L. et al. Environmental fate and bioavailability of agent orange and its associated dioxin during the vietnam war. **Environmental Science and Pollution Research**, Amsterdam, v. 11, n. 6, p. 359-370, Nov. 2004.

ZHANG, Q. et al. Ubiquity and dominance of oxygenated species in organic aerosols in anthropogenically-influenced Northern Hemisphere midlatitudes. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 13, July 2007. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007GL029979/epdf>>. Acesso em: 18 ago. 2016.

ZHOU, H. et al. A review of dioxin-related substances during municipal solid waste incineration. **Waste Management**, Elmsford, v. 36, p. 106-118, Feb. 2015.