

LUCIANA YUMI SHINOTSUKA  
MARIANA INOUE NAKAGAWA

Avaliação do Ciclo de Vida da Incineração de um  
Resíduo Sólido Urbano

São Paulo  
2014

LUCIANA YUMI SHINOTSUKA  
MARIANA INOUE NAKAGAWA

Avaliação do Ciclo de Vida da Incineração de um  
Resíduo Sólido Urbano

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Departamento de Engenharia Química de Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo.  
Orientador: Prof. Dr. Gil Anderi da Silva.

São Paulo  
2014

## **AGRADECIMENTOS**

À nossas famílias, por todo o suporte e encorajamento ao concluir essa etapa;

Ao Professor Gil Anderi da Silva, pela orientação e incentivo;

Ao Alex Rodrigues Nogueira, por sua paciência e disposição a ajudar;

Ao Grupo de Prevenção à Poluição (GP2), por disponibilizarem o espaço para estudo.

## RESUMO

Uma das grandes preocupações atuais refere-se à geração de resíduos. O aumento da população, acompanhado de um maior consumo de bens materiais resulta em grandes quantidades de resíduos produzidos. Assim, torna-se cada vez mais preocupante o descarte dos mesmos com baixos impactos ambientais.

Considerando que grande parte dos resíduos sólidos urbanos no Brasil destina-se a aterros sanitários, visa-se estudar métodos alternativos de tratamento e disposição final de RSU, entre eles a incineração.

O processo de incineração estudado é composto por uma câmara de combustão, equipamentos de aproveitamento energético, de tratamento de gases e de tratamento de efluentes líquidos. A combustão ocorre nas câmaras e os gases produzidos saem com energia suficiente para gerar energia elétrica ou térmica. Após recuperação energética, os gases devem passar por um tratamento de modo a estar dentro dos limites de emissão de determinadas substâncias, para serem descartados ao meio ambiente.

Para a avaliação do desempenho ambiental do processo de incineração, foi necessária a utilização de uma ferramenta de análise que permite quantificar os impactos das entradas e saídas referentes ao processo. A técnica empregada foi a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Com o auxílio das ferramentas de análise Excel e o software SimaPro, a quantificação dos impactos ambientais e os responsáveis por alguns impactos ambientais foram obtidos e por meio deste estudo analisados.

Dentre os impactos analisados, podem-se citar mudanças climáticas, formação de material particulado, de oxidantes fotoquímicos, acidificação do solo, entre outros.

Palavras chaves: Incineração, resíduo sólido urbano, análise de ciclo de vida.

## ABSTRACT

Nowadays, one of the greatest concerns refers to the generation of waste. The increasing population accompanied by greater consumption of material goods, results in large amounts of waste produced. Thus, it becomes even more worrying the waste disposal with low environmental impacts.

Considering that a big part of the municipal solid waste in Brazil is taken to landfills, the aim of the study is to obtain alternative methods of treatment and disposal of MSW, including incineration.

The incineration process studied consists of a combustion chamber, energy recovery equipment, gas processing and treatment of wastewater. The combustion occurs in the chambers and gases come out with enough energy to generate electrical energy or thermal energy. After energy recovery, the gases must undergo a treatment in order to be within the emissions limits for certain substances to be discharged to the environment.

To evaluate the environmental performance of the incineration process, it was necessary to use an analysis tool to quantify the impacts of inputs and outputs. The technique employed was the Life Cycle Assessment (LCA).

The LCA was possible to be realized with the assistance of Excel analysis tools and the SimaPro software. The current study quantified the environmental impacts and found the responsible for them.

Among the impacts analyzed, there are: climate change, formation of particulate matter, photochemical oxidants, acidification, and others.

Keywords: Incineration, municipal solid waste, life cycle assessment

## SUMÁRIO

ÍNDICE DE TABELAS .....	7
ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
1. INTRODUÇÃO .....	10
2. OBJETIVO.....	11
3. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS - RSU.....	11
3.1 Contextualização .....	11
3.2 Reciclagem .....	13
3.3 Revisão da Literatura .....	14
3.3.1 Definição .....	14
3.3.2 Classificação.....	14
3.3.3 Caracterização .....	15
4. INCINERAÇÃO.....	16
4.1 Contextualização .....	16
4.1.1 Mundo .....	16
4.1.2 Brasil .....	18
4.2 Revisão da Literatura .....	19
4.2.1 Definição .....	19
4.2.2 Tipos de incineradores.....	23
4.2.3 Vantagens e Desvantagens.....	26
4.2.4 Limites de emissão.....	27
4.2.5 Fatores para o sucesso de uma planta de incineração.....	28
5. AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA.....	29
5.1 Definição .....	29
5.2 Vantagens e Desvantagens .....	30
5.3 Formato .....	31
5.3.1 Definição do escopo e objetivo.....	31

5.3.2 Análise de inventário .....	32
5.3.3 Avaliação dos impactos de Ciclo de Vida .....	33
5.2.4 Interpretação.....	33
6. ESTUDO.....	34
6.1 Definição do objetivo e escopo .....	34
6.1.1 Objetivo do estudo.....	34
6.1.2 Escopo do Estudo.....	34
6.2 Análise de inventário.....	35
7. ADAPTAÇÃO DOS DADOS.....	37
7.1 RSU.....	38
7.2 Insumos .....	40
7.3 Processo .....	41
7.4 Transporte.....	41
7.5 Energia .....	41
7.6 Infraestrutura .....	42
8. RESULTADOS .....	42
8.1 Mudanças Climáticas .....	43
8.2 Depleção da Água .....	45
8.3 Oxidante Fotoquímico.....	46
8.4 Formação de Material Particulado .....	48
8.5 Acidificação Terrestre .....	49
8.6 Ocupação de terras urbanas .....	51
9. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	52
10. CONCLUSÃO .....	53
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Principais materiais coletados no Brasil em 2012 .....	13
Tabela 2: Reciclagem dos RSU coletados .....	14
Tabela 3: Alguns países europeus, com número de plantas de incineração instaladas e quantidade de resíduo tratado .....	18
Tabela 4: Limites de emissão para poluentes a serem monitorados continuamente, valores expressos em mg/Nm <sup>3</sup> , base seca, corrigidos a 11% de O <sub>2</sub> .....	27
Tabela 5: Limites de emissão para substâncias inorgânicas específicas, valores expressos em mg/Nm <sup>3</sup> , base seca, corrigidos a 11% de O <sub>2</sub> .....	28
Tabela 6: Limites de emissão de dioxinas e furanos, valores expressos em ng/Nm <sup>3</sup> , base seca, corrigidos a 11% de O <sub>2</sub> .....	28
Tabela 7: Classificação dos dados de resíduos que serão utilizados na simulação.	36
Tabela 8: Adequação dos dados coletados com dados da planilha Excel .....	38
Tabela 9: Produtos químicos utilizados na planilha Excel .....	40
Tabela 10: Adaptações nos insumos.....	40
Tabela 11: Matriz energética do Brasil em 2011 .....	41
Tabela 12: Premissas da infraestrutura .....	42



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Geração de RSU .....	11
Figura 2: Coleta de RSU .....	12
Figura 3: Destinação final dos RSU coletados .....	13
Figura 4: Incineração de resíduos de 1950 à 1990 .....	18
Figura 5: Destinação final dos RSS em 2012 .....	19
Figura 6: Processo de incineração de resíduos sólidos urbanos .....	20
Figura 7: Fluxograma do tratamento de gás .....	23
Figura 8: Representação de um incinerador com forno rotativo .....	24
Figura 9: Representação de um incinerador de câmaras fixas múltiplas .....	24
Figura 10: Representação de um incinerador de leito fluidizado .....	25
Figura 11: Representação de um incinerador de injeção líquida .....	26
Figura 12: Ciclo de Vida de Um produto .....	30
Figura 13: Fases de uma ACV .....	31
Figura 14: Diagrama de blocos do processo de incineração .....	35
Figura 15: Esquema do uso de recursos computacionais para obtenção de resultados .....	38
Figura 16: Mudanças Climáticas - Contribuição dos subprocessos .....	44
Figura 17: Subprocesso Incineração - Principais contribuintes .....	44
Figura 18: Depleção da água - Contribuição dos subprocessos .....	45
Figura 19: Subprocesso NaOH - Principais contribuintes .....	46
Figura 20: Formação de Oxidantes Fotoquímicos - Contribuição dos subprocessos .....	47
Figura 21: Subprocesso Carga da incineração - Principais contribuintes .....	47
Figura 22: Formação de Material Particulado - Contribuição dos subprocessos .....	48
Figura 23: Subprocesso Carga da incineração - Principais contribuintes .....	49
Figura 24: Acidificação terrestre - Contribuição dos subprocessos .....	50

Figura 25: Subprocesso Carga da incineração - Principais contribuintes .....	50
Figura 26: Ocupação de Terras Urbanas - Contribuição dos subprocessos .....	51
Figura 27: Subprocesso Carga do compartimento de escória - Principais contribuintes .....	52

## 1. INTRODUÇÃO

A preservação do meio ambiente é uma preocupação crescente por parte da sociedade, organizações e governo, e vem ganhando cada vez mais espaço para discussões. Diversos estudos são realizados com o intuito de entender os responsáveis, as causas e consequências dos impactos ambientais na natureza.

Dentre muitos dos impactos conhecidos pode-se citar a diminuição da biodiversidade, erosão do solo, inversão térmica, ilhas de calor, poluição das águas e solo, efeito estufa, destruição da camada de ozônio, chuvas ácidas, mudanças climáticas, sendo todas causadas ou agravadas pela ação humana.

Um dos principais motivos pelo aumento desses impactos é o crescente aumento da população e o consumo cada vez maior de bens de consumo que, conseqüentemente, leva à utilização de mais matérias-primas. Um aumento na produção acaba gerando mais resíduos, não apenas devido à fabricação de uma maior quantidade de produtos finais, mas também devido aos resíduos intermediários ao longo da cadeia produtiva. Considerando que a velocidade de geração de resíduos é muito superior à velocidade de decomposição pelo meio ambiente e o descarte dos resíduos não é realizado de uma maneira consciente, o problema com resíduos sólidos, principalmente urbanos, vem se tornando cada vez mais preocupante.

Nesse contexto, onde novas tecnologias e métodos vem sendo desenvolvidos para o tratamento e disposição final de resíduos sólidos, aparece com uma alternativa, o processo de incineração. Este processo não só poderia diminuir o volume de resíduos descartados no meio ambiente como também ser uma alternativa de geração de energia, uma vez que atualmente não se pode depender de apenas uma fonte de energia.

Com o intuito de verificar se o processo realmente é eficiente em termos ambientais, ou seja, minimiza os efeitos dos resíduos sólidos sobre o meio ambiente, faz-se necessária a utilização de ferramentas que permitam uma quantificação e comparação dos impactos causados. Tais utilidades podem ser encontradas na Avaliação de Ciclo de Vida – ACV, uma ferramenta utilizada para avaliar os impactos ambientais de um processo ou produto ao longo de seu ciclo de vida.

## 2. OBJETIVO

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo avaliar os impactos ambientais causados por uma planta de incineração localizada na Região Metropolitana de Campinas, além de identificar oportunidades de melhoria de desempenho ambiental da mesma.

## 3. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS - RSU

### 3.1 Contextualização

A geração de resíduos sólidos urbanos – RSU no Brasil e no mundo vem crescendo cada vez mais, impulsionada principalmente pelo aumento da população. O estudo realizado pela **ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais**, *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2012*, apresenta alguns dados sobre a situação atual dos RSU no Brasil.

De acordo com o estudo, foi observado nos últimos anos que o aumento na quantidade de resíduos gerados é superior à taxa de crescimento populacional. O fato pode ser confirmado ao se comparar os números de 2011 e 2012, onde no Brasil a geração de resíduos sólidos cresceu 1,3% e a taxa de crescimento foi de 0,9% (Figura 1).

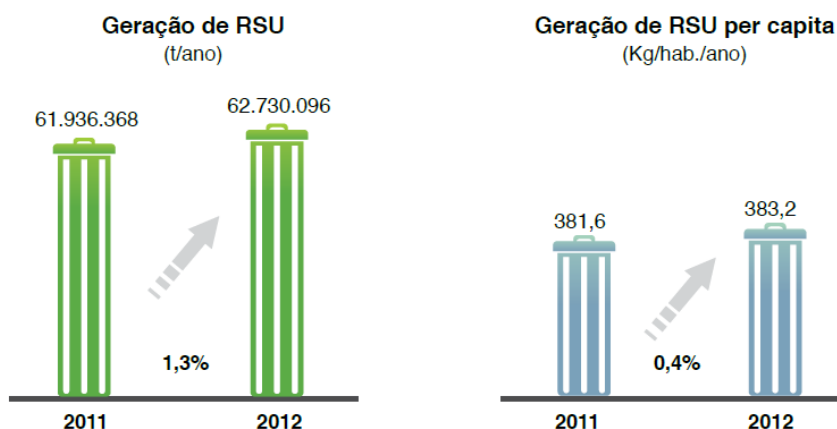


Figura 1: Geração de RSU

(Fonte: Pesquisa ABRELPE e IBGE)

A Figura 2 compara a coleta total e per capita. Em termos de coleta total, houve um aumento de 1,9% na quantidade de RSU coletados em 2012 relativamente a 2011. Em relação à coleta per capita, o aumento foi de 1,8%. A comparação deste índice com o crescimento da geração de RSU mostra uma discreta melhora nos serviços de coleta de RSU, chegando a 90,17% (Panorama ABRELPE, 2012).

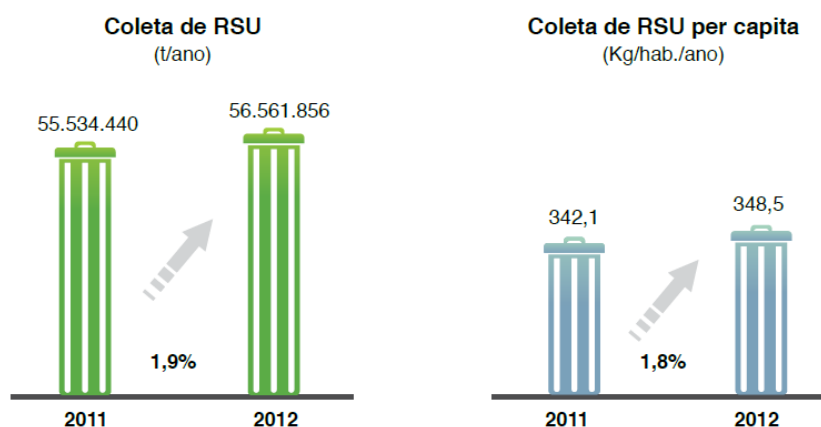


Figura 2: Coleta de RSU

(Fonte: Pesquisa ABRELPE e IBGE)

Em 2012, cerca de 60% dos municípios brasileiros registraram alguma iniciativa de coleta seletiva. Embora seja expressiva a quantidade de municípios com iniciativas de coleta seletiva, convém destacar que muitas vezes estas atividades resumem-se à disponibilização de pontos de entrega voluntária ou convênios com cooperativas de catadores, e não abrangem a totalidade do território ou da população.

A comparação da situação da destinação final dos RSU entre os anos de 2011 e 2012 mostra que os números mantiveram-se quase os mesmos. A pesquisa realizada pela ABRELPE revela que 58% dos RSU coletados no país são destinados corretamente. Porém, o ponto agravante é o fato de que do ano de 2011 para 2012, a quantidade de RSU destinado inadequadamente cresceu 0,08%. Este número pode parecer pequeno, porém equivale à 23,7 milhões de toneladas de resíduos que são levados para lixões ou aterros controlados, que do ponto de vista ambiental pouco se diferenciam dos lixões, pois não tomam as precauções necessárias para a proteção do meio ambiente e da saúde pública. A Figura 3 ilustra a situação da destinação final dos RSU.

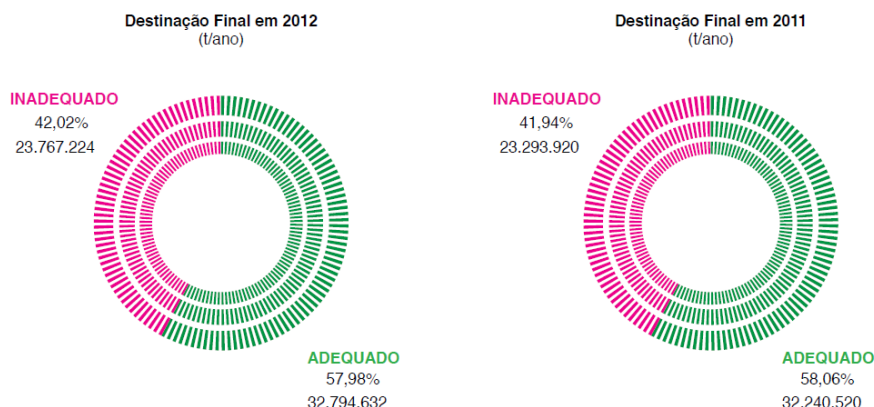


Figura 3: Destinação final dos RSU coletados

(Fonte: Pesquisa ALBREPE)

A Tabela 1 classifica os resíduos em 6 grandes grupos: metal, papel e semelhantes, plástico, vidro, matéria orgânica e outros; e mostra as respectivas participações em relação ao total e a quantidade anual coletada.

Tabela 1: Principais materiais coletados no Brasil em 2012

Material	Participação (%)	Quantidade (t/ano)
Metais	2,9	1.640.294
Papel, Papelão e TetraPak	13,1	7.409.603
Plástico	13,5	7.635.851
Vidro	2,4	1.357.484
Matéria Orgânica	51,4	29.072.794
Outros	16,7	9.445.830
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>56.561.856</b>

(Fontes: Pesquisa ABRELPE, 2012)

### 3.2 Reciclagem

No Brasil, quatro setores industriais possuem considerável participação nas atividades de reciclagem, sendo eles o alumínio, papel, plástico e vidro. A Tabela 2 apresenta os percentuais de reciclagem de cada material em relação a seu consumo. No caso do alumínio, destacam-se a reciclagem de latas de alumínio e no caso do plástico, de garrafas PET.

Tabela 2: Reciclagem dos RSU coletados

<b>Ano</b>	<b>Alumínio (Latas)</b>	<b>Papel</b>	<b>Vidro</b>	<b>Plástico (PET)</b>
2011	98,3	45,5	-	57,1
2010	97,6	44	-	55,8
2009	98,2	46	47	55,6

(Fontes: ABRELPE, 2012)

É possível notar que a reciclagem de alumínio é a que possui o maior índice, no entanto, o mesmo não ocorre por incentivos governamentais ou conscientização da população, mas principalmente pelo fato de seu preço de venda (privada) ser muito superior aos outros materiais.

Vale ressaltar que para nenhum dos componentes houve aumento significativo da reciclagem ao decorrer dos anos de 2009 a 2011.

### 3.3 Revisão da Literatura

#### 3.3.1 Definição

Resíduos sólidos urbanos, popularmente chamados de 'lixos', são definidos pela norma ABNT NBR 10004 como:

*[...] resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível [...].*

#### 3.3.2 Classificação

A classificação de resíduos sólidos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido (ABNT NBR 10004).

Os resíduos podem ser classificados de diversas formas, através do estado físico (sólido, líquido, gasoso), uso original (alimentos, embalagens, etc.), material

(vidro, papel, etc.), propriedades físicas (combustível, compostável, reciclável), origem (doméstico, comercial, agrícola, hospitalar, urbano), periculosidade (perigosos ou não perigosos) (MCDOUGALL et al, 2001).

Quanto à natureza ou origem, os resíduos são agrupados em: lixo doméstico ou residencial, lixo comercial, lixo público, lixo domiciliar especial (entulho de obras, pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes, pneus) e lixo de fontes especiais (industrial, radioativo, de portos, aeroportos e terminais rodoferroviários, agrícola e resíduo de serviços de saúde).

Levando em consideração à periculosidade, ou seja, os potenciais riscos à saúde pública e ao meio ambiente, os resíduos sólidos são classificados da seguinte maneira:

- a) Resíduos classe I – Perigosos;
- b) Resíduos classe II – Não perigosos;
  - Resíduos classe II A – Não inertes;
  - Resíduos classe II B – Inertes.

### **3.3.3 Caracterização**

Para auxiliar na seleção do processo, é interessante conhecer as características químicas dos resíduos que serão tratados. Segundo o Programa de Pesquisas de Saneamento Básico (2003), algumas das características são: poder calorífico, pH, composição química (nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre e carbono), relação teor de carbono/nitrogênio, sólidos totais fixos, sólidos voláteis, teor de umidade e composição gravimétrica.

Quanto às características relevantes para a incineração, é interessante que o resíduo seja orgânico (principais constituintes: carbono, hidrogênio e oxigênio) e que seu poder calorífico inferior (PCI) seja superior a 4700 kcal/kg. Alguns exemplos são: solventes, óleos, emulsões, plásticos, resíduos hospitalares, pesticidas, farmacêuticos, refinarias, fenólicos, graxas, entre outros.



## 4. INCINERAÇÃO

### 4.1 Contextualização

A incineração é um método de processamento de resíduos que vem sendo utilizada pela humanidade desde o início do século. Durante as últimas décadas, tem sido amplamente utilizada e com isso tecnologias cada vez mais modernas vêm sendo desenvolvidas com o intuito de melhorar o rendimento do processo, em termos de eficiência de queima e geração de energia, e reduzir as emissões de poeira e gases na atmosfera.

#### 4.1.1 Mundo

A incineração pode ser caracterizada em quatro gerações quanto à evolução do processo ao longo dos anos (MENEZES, 2000).

- **1ª Geração - 1950 -1965**

Anteriormente a 1950 as plantas existentes eram demasiadamente incipientes, caracterizando-se como um primeiro estágio de evolução aquelas instaladas de 1950 a 1965. Nesta fase, a função única era a de reduzir o volume o lixo. Os gases eram descarregados diretamente na atmosfera sem tratamento algum e a concentração de poeira atingia níveis de  $1000 \text{ mg/Nm}^3$  (como base para comparação, os sistemas atuais atingem até  $3\text{mg/Nm}^3$ ). Nesta fase apareceram as primeiras torres de água de refrigeração instaladas sobre a câmara de combustão. As principais plantas desta geração foram as de Lousanne (1959), Berna (1954), Bruxelas (1957) - Von Roll.

- **2ª Geração - 1965 – 1975**

Nesta época aparecem os primeiros sistemas de proteção do meio ambiente, que reduzem as emissões a  $100\text{mg/Nm}^3$ . Aparecem as plantas de grande capacidade e os incineradores com câmara dupla, cujo objetivo era melhorar a eficiência de queima. Surgem os primeiros interesses em recuperação de calor para a geração de energia, nascendo com esse propósito a empresa Babcock,

especializada no fornecimento de tecnologias Waste-to-Energy (geração de energia a partir da queima do lixo).

### **3ª Geração - 1975 - 1990**

A fase de 75 a 90 é caracterizada, no mundo desenvolvido, pelo aumento da performance energética e desenvolvimento das normas de proteção ambiental, sendo que o público começa a estar mais atento aos problemas de poluição. São introduzidos nos equipamentos sistemas complexos de lavagem de gases para reduzir as emissões de gases ácidos, com a neutralização de HCl, SO<sub>x</sub>, HF e metais pesados. As caldeiras são muito melhoradas e ocorre a melhoria nos processos de combustão dos orgânicos. A automação do processo na planta passa a ser centralizada e multiplicam-se os centros de tratamento com cogeração de energia.

- **4ª Geração - 1990 - atual**

A partir de 1990 ampliam-se as pressões dos movimentos verdes. Com isso, o tratamento de gases é sofisticado ainda mais e avançam os sistemas para a remoção de poluentes como NO<sub>x</sub>, dioxinas e furanos, perseguindo a meta de emissão Zero. Passam a surgir tecnologias avançadas de tratamento para a produção de resíduos finais inertes, que podem ser reciclados ou dispostos sem agressão ao meio ambiente, tal como o uso do plasma térmico.

Atualmente, vários processos se aprimoraram no pré-tratamento do lixo, anterior à incineração, de tal forma a transformá-lo em um combustível de qualidade para a maximização na geração de energia. Melhoram-se também os processos de combustão com o aumento dos sistemas de turbilhonamento, secagem, ignição e controle da combustão.

A Figura 4 apresenta uma esquematização da evolução de uma planta de incineração dos anos 50 para os anos 90.

Até 1950 as plantas de incineração eram compostas apenas por um forno e uma chaminé.

As plantas modernas têm que executar uma operação muito mais complexa do que apenas reduzir o volume e o peso do lixo através da incineração.

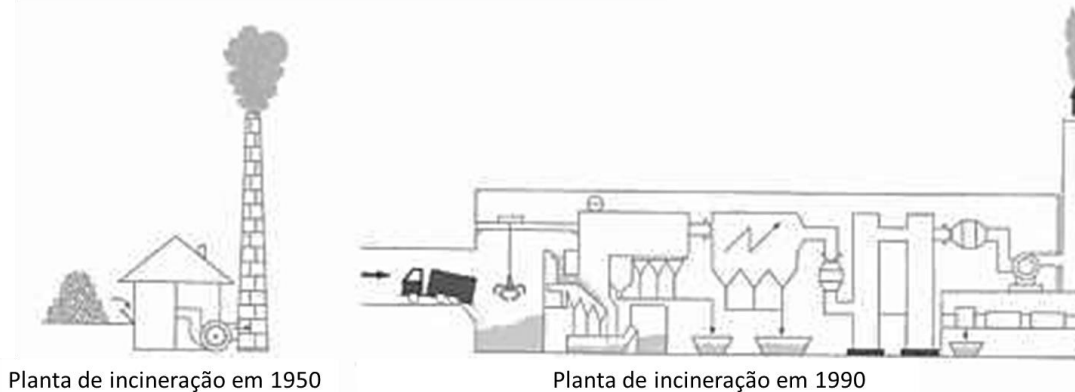


Figura 4: Incineração de resíduos de 1950 à 1990

(Fonte: Menezes, 2000)

Abaixo, a Tabela 3 apresenta as plantas de incineração na Europa:

Tabela 3: Alguns países europeus, com número de plantas de incineração instaladas e quantidade de resíduo tratado

Países	Nº plantas		Quantidade de resíduo tratado (milhões de toneladas)	
	2001	2011	2001	2011
França	140	129	12	12,9
Alemanha	56	75	13,2	21,2
Itália	44	46	2,9	5,8
Suécia	24	32	2,4	5,2
Suíça	28	30	3	3,5
Dinamarca	31	27	3,2	3,3

(Fonte: Cewep.eu)

#### 4.1.2 Brasil

No Brasil, o processo de incineração vem sendo aplicado há tempos, sendo que o primeiro incinerador municipal foi instalado em 1896 em Manaus processar 60 t por dia de lixo doméstico, tendo sido desativado somente em 1958 por problemas de manutenção. Também há registros de um equipamento similar instalado em Belém e desativado em 1978 pelos mesmos motivos (MENEZES, 2000).

No município de São Paulo, em 1913 foi instalado, no bairro de Araçá um incinerador com a capacidade de 40 t/dia. Este antigo incinerador utilizava a queima

de lenha para manter a temperatura de combustão do lixo e a alimentação do lixo no forno era realizada manualmente. Além disso, era equipado com um sistema de recuperação de energia, que constituía de uma caldeira e um alternador, que foi desativado por problemas de adaptação à rede elétrica. Devido ao aumento da quantidade de lixo coletado que ultrapassava a capacidade do incinerador e por se encontrar muito próximo de residências, o incinerador foi desativado e demolido.

A incineração no Brasil é utilizada principalmente como um meio para a destinação final dos resíduos sólidos de saúde. Os equipamentos em geral, são de pequeno porte, instalados em hospitais, casas de saúde, etc. Porém, de acordo com a pesquisa realizada pela ABRELPE, a coleta de RSS realizada pelos municípios é parcial, o que contribui para o desconhecimento da quantidade total gerada e o destino real dos RSS no Brasil. A Figura 5 apresenta o cenário da destinação dos resíduos coletados no ano de 2012.

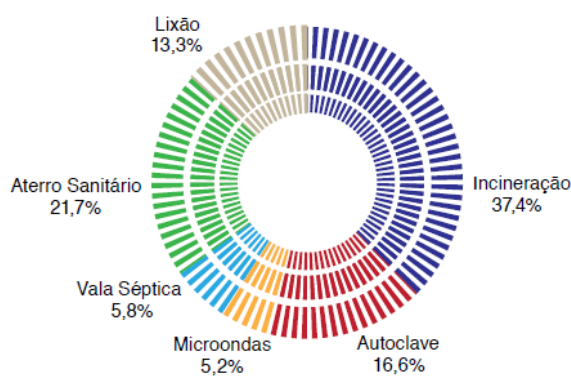


Figura 5: Destinação final dos RSS em 2012

(Fonte: Pesquisa ABRELPE)

## 4.2 Revisão da Literatura

### 4.2.1 Definição

Incineração, resumidamente, consiste em um processo de redução de peso, volume e das características de periculosidade dos resíduos, com a consequente eliminação da matéria orgânica e características de patogenicidade, através da combustão controlada. É ainda um processo de reciclagem da energia liberada na queima dos resíduos, visando a produção de energia elétrica e vapor. A Figura 6 mostra um exemplo de processo de incineração de resíduos sólidos urbanos.

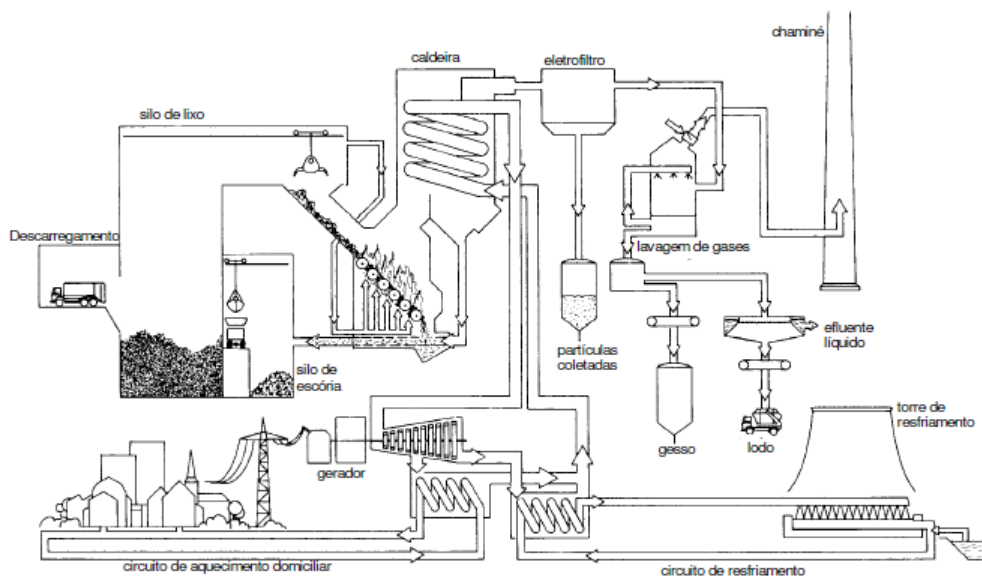


Figura 6: Processo de incineração de resíduos sólidos urbanos

(Fonte: Melo, 2013)

O processo, geralmente, consiste em uma sequência de etapas:

- 1) Preparação do resíduo para a queima;
- 2) Alimentação das câmaras de combustão;
- 3) Combustão nas câmaras.

Após a combustão, os produtos queima são submetidos aos processos de:

- Recuperação de energia;
- Tratamento dos gases;
- Tratamento do efluente líquido (pode não existir de acordo com o tratamento dos gases);
- Acondicionamento e disposição dos resíduos sólidos gerados.

A incineração se inicia com a preparação do resíduo, que consiste em diversas operações, tais como: mistura, peneiramento, trituração e aquecimento, que possuem como objetivo aumentar a homogeneidade, baixar a umidade e melhorar o poder calorífico da alimentação.

Na etapa de alimentação das câmaras são necessários equipamentos diferenciados e tratamentos prévios do resíduo, além do realizado na etapa de preparação do resíduo, de acordo com suas características. Líquidos, em geral, são

alimentados às câmaras por bicos sprays ou queimadores atomizadores. Para evitar entupimento dos mesmos, em caso de existência de sólidos em suspensão, o resíduo deve passar por filtros. Além disso, o resíduo é ainda misturado e preparado de forma que seu poder calorífico esteja acima de um limite estabelecido, caso contrário pode ser necessário o uso de combustível complementar. Resíduos sólidos, por sua vez, são alimentados através de alimentadores pneumáticos, vibradores, correia transportadora ou simplesmente pela ação da gravidade. As partículas sólidas podem passar ainda por uma etapa de trituração, para controle de tamanho de partícula.

A terceira etapa indica a combustão nas câmaras. Dentre os diversos tipos de câmaras, os fatores que irão determinar qual empregar são: estado físico do resíduo e capacidade necessária. Os principais tipos de câmara são:

- Forno rotativo;
- Câmara fixa;
- Leito fluidizado;
- Injeção líquida;
- Grelha móvel.

Cada espécie é mais bem detalhada posteriormente no Item 4.2.2.

As câmaras variam em seu funcionamento e condições de operação: quantidade de oxigênio, temperatura, pressão, tempo de residência. Vale ressaltar que é importante que haja turbulência nessa etapa, uma vez que a mesma irá garantir uma oxidação homogênea e mais eficiente dos resíduos. Um meio de produzir turbulência é a injeção de ar nas câmaras.

Independentemente do tipo de câmara utilizada, após a etapa de combustão serão produzidas escórias, cinzas e gases. Escórias são os resíduos não queimáveis que permanecem no fundo da câmara de combustão, compostos principalmente por sílica, cal, alumina e óxido de ferro. Os resíduos metálicos contidos na escória são removidos com o auxílio de um equipamento eletromagnético e os metais recuperados podem ser comercializados. Após a

retirada dos resíduos metálicos, a escória pode ser reutilizada como material de construção ou apenas depositadas em aterros.

Das câmaras de combustão saem os gases que arrastam consigo as cinzas produzidas na queima. Devido à alta energia térmica contida nestes gases, os mesmos são geralmente aproveitados como um meio de geração de energia, sendo que as principais tecnologias disponíveis para o aproveitamento energético são a turbina a vapor e flue gas condensation. A turbina a vapor possui como vantagens sua alta eficiência e operação suave. Para seu uso, é preciso que os gases estejam a alta pressão e temperatura. O flue gas condensation é utilizado para RSU com alto teor de água, uma vez que o processo condensa a água presente no gás.

Após o aproveitamento energético, os gases e cinzas que se encontram em temperaturas mais amenas, passam por um tratamento para controle de poluição do ar. O tratamento é composto por diferentes processos, cada um responsável pelo tratamento de um determinado tipo de substância contaminadora, que será descrito a seguir.

O processo de tratamento é iniciado com a retirada das partículas finas e poeira do gás, podendo ser utilizados, para tal, precipitadores eletrostáticos ou filtros manga. Os gases de combustão também apresentam componentes nocivos tais como óxidos nitrosos, compostos organoclorados e metais voláteis, que devem ser eliminados. Alguns exemplos de processos utilizados para este fim são: pulverização de hidróxido de cálcio, lavagem dos gases, leito adsorvente com carvão ativado, SCR (redução catalítica seletiva), SNCR (redução catalítica não-seletiva). Caso seja escolhido o processo de lavagem de gás, devido a necessidade da utilização de água de limpeza, será necessário o tratamento do efluente líquido, que consiste nas etapas de neutralização, precipitação, sedimentação e desidratação da lama.

Apenas após o término do tratamento, os gases serão lançados pela chaminé para o meio ambiente e o efluente purificado será descarregado em rios. O fluxograma a seguir descreve os processos de tratamento pelos quais o gás é submetido.

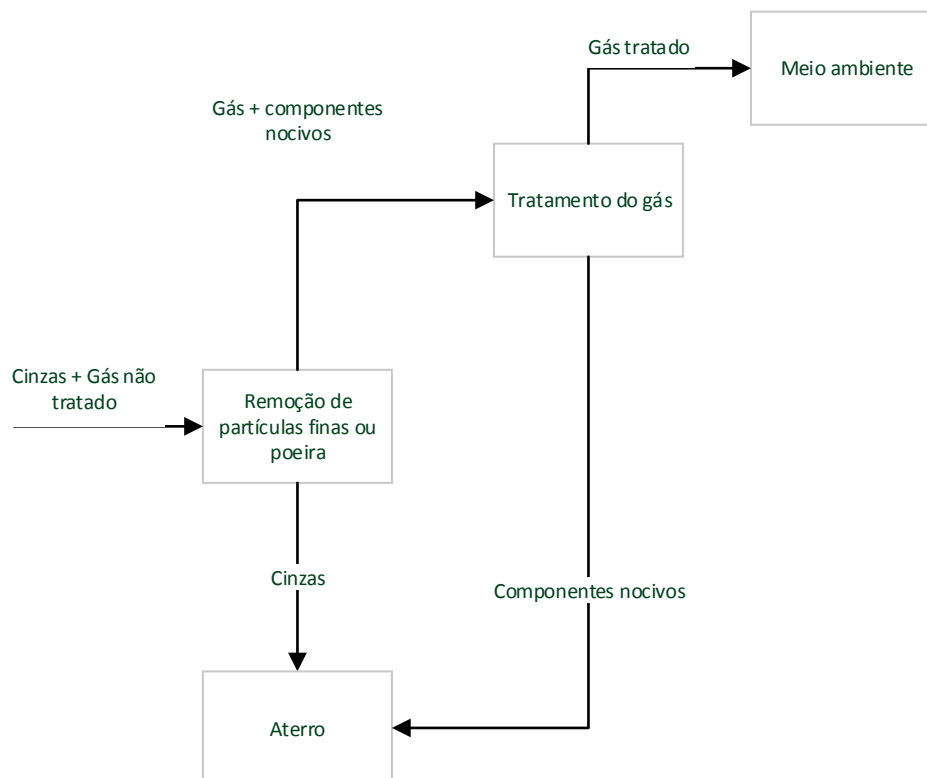


Figura 7: Fluxograma do tratamento de gás

## 4.2.2 Tipos de incineradores

A seguir, serão brevemente descritos alguns tipos de incineradores, segundo Dempsey e Oppelt (1999):

### 4.2.2.1 Incinerador com forno rotativo

São mais versáteis, pois atendem a diversos tipos de resíduos (sólidos, líquidos, lama). A rotação do forno faz com que haja uma homogeneização e maior facilidade no transporte do resíduo a ser queimado. Esse deslocamento pode ocorrer tanto co-corrente em relação ao gás como em contra-corrente. O tempo de residência, que costuma ser entre 0,5h a 1,5h varia de acordo com a velocidade rotacional do forno, velocidade de alimentação de resíduos e a presença de barreiras.

Costuma-se haver um pós-queimador, para assegurar que de fato todo o resíduo foi queimado, conforme demonstrado na Figura 8.



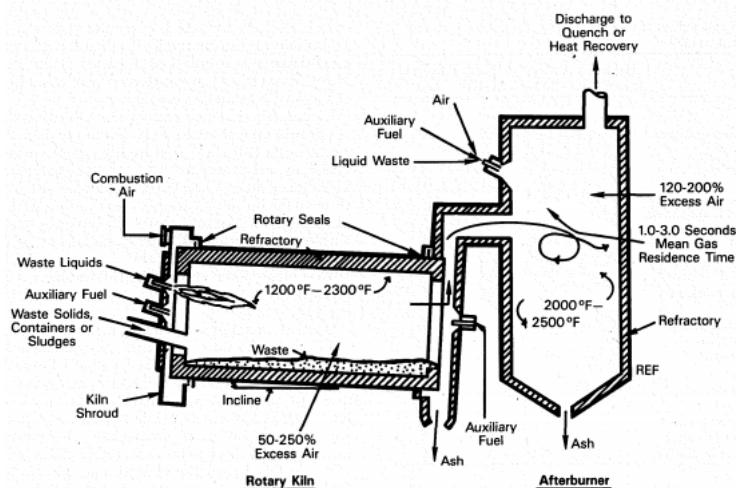


Figura 8: Representação de um incinerador com forno rotativo

(Fonte: Dempsey e Oppelt, 1999)

#### 4.2.2.2 Incinerador de câmaras fixas múltiplas

Consiste em duas câmaras: a primeira possui menos ar do que o necessário estequiometricamente. Isso faz com que haja uma evaporação de grande parte dos produtos voláteis. A fumaça resultante e os produtos da primeira combustão (hidrocarbonetos voláteis e monóxido de carbono) passam para a segunda câmara, onde há ar suficiente ou até em excesso para que ocorra combustão completa. Assim, há menor formação de material particulado no gás de combustão.

Sua menor capacidade e seu custo de capital mais baixo fazem com que esses incineradores sejam mais utilizados em pequenas instalações dentro das fábricas.

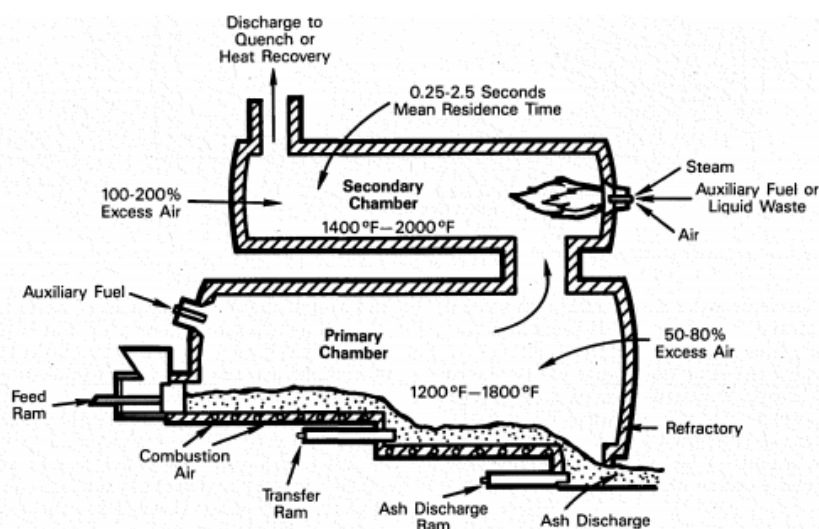


Figura 9: Representação de um incinerador de câmaras fixas múltiplas

(Fonte: Dempsey e Oppelt, 1999)

#### 4.2.2.3 Incinerador de leito fluidizado

Grande utilização para líquidos, lodos ou materiais sólidos fragmentados. O leito pode ser do tipo circulante ou borbulhante e é revestido de refratário, areia, alumina, carbonato de cálcio de outros materiais semelhantes. Para que ocorra distribuição dos resíduos no leito e que não haja retenção dos mesmos no leito, é necessário um pré-peneiramento ou moagem, ou seja, uniformização no tamanho dos resíduos. Esse tipo de incinerador oferece altas razões gás-sólido, altas eficiências de transferência de calor, temperatura uniforme ao longo do leito, entre outras.

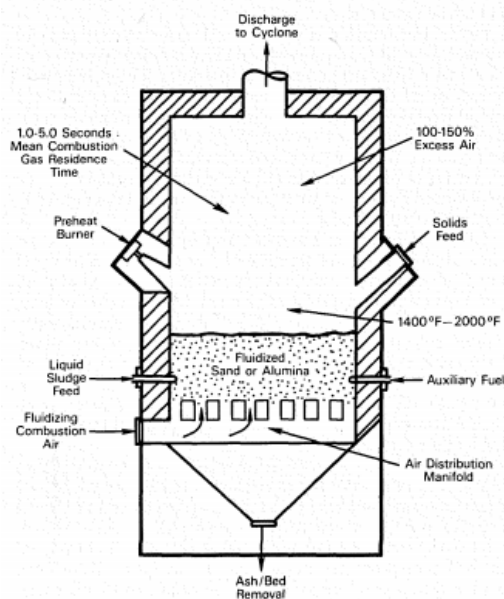


Figura 10: Representação de um incinerador de leito fluidizado

(Fonte: Dempsey e Oppelt, 1999)

#### 4.2.2.4 Incinerador de injeção líquida

Sua principal aplicação é em resíduos líquidos bombeáveis. O incinerador é basicamente um cilindro revestido de material refratário com um ou mais queimadores. O resíduo líquido é injetado no queimador, onde é atomizado em pequenas gotículas e queimado em suspensão.

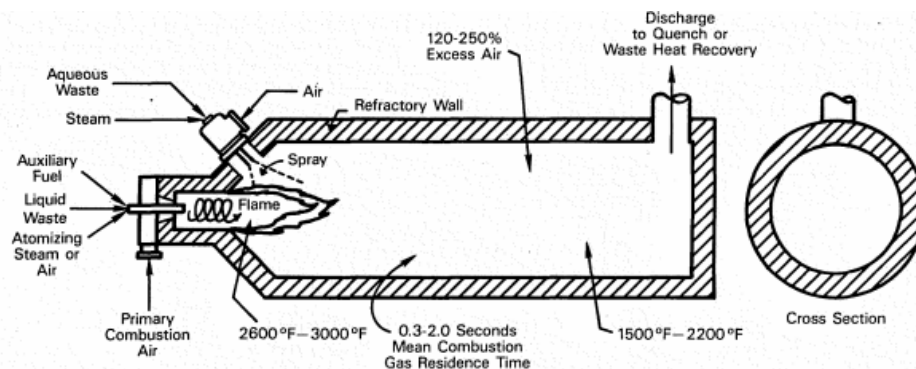


Figura 11: Representação de um incinerador de injeção líquida

(Fonte: Dempsey e Oppelt, 1999)

#### 4.2.2.5 Incinerador de grelha móvel

Os incineradores de grelha móvel possuem grande aplicação no tratamento de resíduo sólido urbano devido a continuidade de seu processo, enquanto incineradores de câmaras fixas ocorrem em batelada.

O RSU é alimentado no topo da grelha e as mesmas fazem o movimento ascendente, arrastando consigo as escórias (RSU já queimado). Elas misturam-se ao RSU que está sendo alimentado, secando-o nas primeiras grelhas. Isso faz com que haja redução da umidade e conseqüentemente a combustão é facilitada. Caso o RSU possua alto teor de umidade, é necessário injetar um combustível adicional.

#### 4.2.3 Vantagens e Desvantagens

O processo de incineração possui vantagens e desvantagens que devem ser levados em consideração ao escolher o processo de disposição final do RSU. Os principais fatores são listados a seguir.

Como pontos positivos, vale ressaltar que a incineração reduz drasticamente o volume de resíduos a ser descartado (cerca de 90%), destrói organismos patogênicos e orgânicos, e sua planta necessita de uma área relativamente pequena e que pode ser instalada próxima aos centros geradores de resíduos, economizando em transporte. Além disso, é possível recuperar parte da energia liberada no processo de queima, transformando-a em energia térmica ou elétrica.

Os pontos negativos incluem seu custo elevado (tanto no investimento inicial como o custo operacional), dificuldade de operação e de manutenção, pois há variabilidade de acordo com a composição dos resíduos sólidos e exige-se mão de

obra qualificada. Há também uma grande preocupação com medidas de controle ambiental, que é expressa através de limites de emissões estabelecidos por órgãos governamentais, como será apresentado a seguir.

#### 4.2.4 Limites de emissão

A resolução SMA-079, publicada em 04 de novembro de 2009, pela Secretaria de estado do Meio Ambiente, estabelece condições operacionais, limites de emissão, critérios de controle e monitoramento que as Usinas de Recuperação de Energia (URE) que devem ser respeitados para estarem de acordo com o licenciamento.

Nos artigos 8º, 9º e 14º, são definidos os limites de emissão de alguns poluentes para a atmosfera.

Tabela 4: Limites de emissão para poluentes a serem monitorados continuamente, valores expressos em mg/Nm<sup>3</sup>, base seca, corrigidos a 11% de O<sub>2</sub>

<b>Parâmetro</b>	<b>Limite de emissão</b>
Material particulado (MP)	10
Óxido de enxofre (SO <sub>x</sub> ), expressos em SO <sub>2</sub>	50
Óxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> ) expressos em NO <sub>2</sub>	200
Ácido clorídrico (HCl)	10
Ácido fluorídrico (HF)	1
Hidrocarbonetos totais - HCT (expresso como metano e não metano)	10
Monóxido de carbono (CO)	50

(Fonte: Secretaria do estado do meio ambiente. Resolução SMA-079 de 04 de novembro de 2009)

A Tabela 5 apresenta os limites para substâncias inorgânicas, calculados a partir dos valores médios obtidos durante o período de amostragem mínimo de 30 minutos de máximo de 8 horas.

Tabela 5: Limites de emissão para substâncias inorgânicas específicas, valores expressos em mg/Nm<sup>3</sup>, base seca, corrigidos a 11% de O<sub>2</sub>

<b>Parâmetro</b>	<b>Limite de emissão</b>
Cd + Ti e seus compostos	0,05
Hg e seus compostos	0,05
Pb + As + Co + Ni + Cr + Mn + Sb + Cu + V e seus compostos	0,5

(Fonte: Secretaria do estado do meio ambiente. Resolução SMA-079 de 04 de novembro de 2009)

Dioxinas e furanos são compostos muito persistentes que permanecem adsorvidos fortemente a partículas do ar, solo e sedimento e podem causar sérios problemas à saúde humana (GARABRANT, 2009). A Tabela 6 apresenta os limites de emissão de dioxinas e furanos, calculados a partir dos valores médios obtidos durante o período de amostragem mínimo de 30 minutos de máximo de 8 horas.

Tabela 6: Limites de emissão de dioxinas e furanos, valores expressos em ng/Nm<sup>3</sup>, base seca, corrigidos a 11% de O<sub>2</sub>

<b>Parâmetro</b>	<b>Limite de emissão</b>
Dioxinas e furanos	0,1

(Fonte: Secretaria do estado do meio ambiente. Resolução SMA-079 de 04 de novembro de 2009)

#### 4.2.5 Fatores para o sucesso de uma planta de incineração

Para o sucesso de uma planta de incineração deve-se levar em consideração não só os aspectos apresentados anteriormente, mas também as partes que estarão envolvidas no processo.

Os principais grupos de interesse em uma planta de incineração, segundo o Guia de tomada de decisão de incineração de RSU (Decision Makers' Guide to Municipal Solid Waste – The World Bank, 1999) são: setor de resíduo, setor de energia, comunidade e proprietários da planta.

Em geral, aterros são significativamente mais baratos que plantas incineradoras. Isso torna o setor de energia o ponto crucial, pois o custo da incineração será menor através da venda de energia produzida na mesma. No entanto, um fator a ser considerado é a forma de utilização da energia produzida: aquecimento para a vizinhança, energia elétrica ou combinação dos anteriores. Isso

acarretará em mudanças nos equipamentos e custos. Além disso, deve-se levar em conta a concessão para produção e venda de energia, que costuma ser de difícil acesso e limitada para poucas empresas. A precificação da energia muitas vezes requer decisão governamental e é sujeita a taxações e subsídios.

Com relação ao setor de resíduo, é necessário que o mesmo tenha um sistema de gestão bem desenvolvido e controlado, que carece de sinergia entre os setores da coleta, transporte, reciclagem e aterros. É de suma importância que haja um controle global do fluxo de resíduo, assegurando o fornecimento confiável e mínimo de resíduos para a planta de incineração.

A comunidade do local onde a planta será instalada pode possuir certa resistência à construção e operação da mesma, geralmente causada por falta de conhecimento do processo. Assim, é interessante realizar campanhas de conscientização pública durante o período de planejamento e discussões com ONGs sobre medidas de proteção ao meio ambiente, estabelecendo limites de emissão de gases.

O proprietário, em geral organizações e empresas financiadoras, deve preocupar-se em fechar acordos de longo prazo de fornecimento de resíduos (considerando quantidade e qualidade) e de venda da energia, pois os riscos envolvidos são altos. A operação e manutenção da planta devem ser realizadas por uma equipe com pessoas qualificadas e experientes no ramo, o que faz com que os custos sejam muitos altos, visto que não muitas empresas especializadas no processo de incineração.

## **5. AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA**

### **5.1 Definição**

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que permite avaliar o desempenho ambiental de um processo ou um produto em seu ciclo de vida. Por ciclo de vida entende-se um conjunto de todas as etapas necessárias para que um produto cumpra sua função, desde a obtenção dos recursos naturais usados na sua fabricação até sua disposição final, após o cumprimento de sua função (SILVA, 2007), conforme é ilustrado na Figura 12.

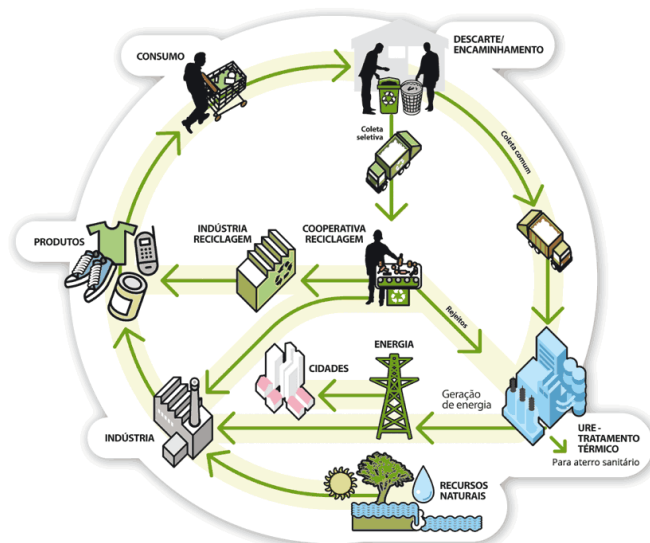


Figura 12: Ciclo de Vida de Um produto

(Fonte: URE Barueri. Transformando resíduos em energia)

A ACV permite também realizar a comparação dos impactos ambientais entre processos ou produtos que exerçam uma mesma função.

## 5.2 Vantagens e Desvantagens

A Avaliação de Ciclo de Vida é uma técnica que serve como uma ferramenta de apoio à tomada de decisões. A partir da avaliação dos impactos associados à função do produto ou processo, pode ser aplicada de duas formas: como um meio de identificar melhorias para seu desempenho ambiental ou como uma forma de comparação entre dois sistemas.

A ACV ainda pode ser utilizada como meio de suporte para o desenvolvimento do planejamento estratégico e otimização de projetos, produtos e processos, suporte para cumprir as normas ambientais e como forma de marketing ambiental.

Algumas desvantagens da técnica são o fato de não haver uma metodologia consolidada para a ACV, a falta de modelos e de banco de dados para a avaliação de impactos, a subjetividade dos critérios para a tomada de decisão e o grande número de dados necessários para o estudo.

### 5.3 Formato

Com o intuito de padronizar os trabalhos relacionados à ACV, existem algumas normas reguladoras, como a série ISO 14040 de gestão ambiental, que define os princípios e estrutura e os requisitos e orientação.

De acordo com a ISO 14040, para a realização da ACV devem ser realizadas as seguintes etapas:

- Definição do escopo e objetivo;
- Análise de inventário de Ciclo de Vida;
- Avaliação do impacto de Ciclo de Vida;
- Interpretação.

Sendo que todas as etapas se relacionam entre si, podendo, ao longo do estudo, mudar o objetivo ou o escopo previamente estabelecido de acordo com as necessidades e dificuldades enfrentadas durante o processo de coleta de dados e avaliação de impactos. A Figura 13 ilustra as fases da ACV.

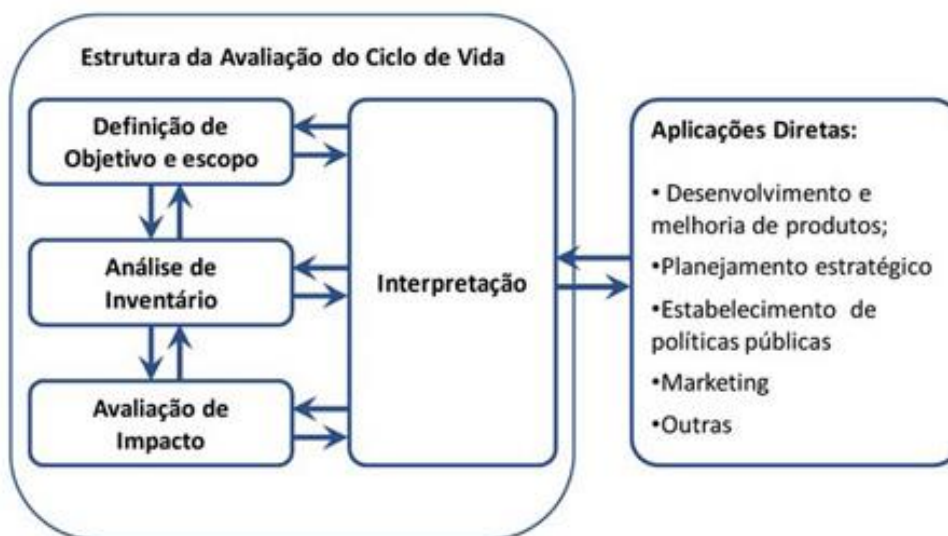


Figura 13: Fases de uma ACV

(Fonte: Norma ABNT NBR ISO 14040, 2009)

#### 5.3.1 Definição do escopo e objetivo

A importância desta etapa está em se definir as razões para a realização do estudo, assim como determinar o nível de abrangência, em termos da cobertura temporal, geográfica e tecnológica. Na cobertura temporal deve ser descrita idade dos dados e período mínimo de tempo durante o qual os dados deveriam ser



coletados; na cobertura geográfica a área geográfica a partir da qual deveriam ser coletados dados para processos elementares de modo a satisfazer o objetivo do estudo e na cobertura tecnológica, a tecnologia específica ou conjunto de tecnologias consideradas no estudo (NBR ISO 14044, 2009 p. 10).

Nesta etapa também são estudados o público alvo, sendo que, dependendo do grupo que será destinado o estudo o nível de profundidade necessária será diferente.

No escopo são definidos: a unidade funcional, a função do produto ou processo, a fronteira do sistema, além de apresentar os critérios e hipóteses que serão adotados e as categorias de impacto que serão consideradas para a análise do desempenho ambiental.

É importante que os termos e os conceitos utilizados nesta etapa estejam bem definidos para um bom andamento do estudo. Unidade funcional é a quantidade do produto que será considerada no estudo (1 tonelada, 1 m<sup>3</sup>, etc). Como função entende-se pela finalidade, o uso final do produto ou processo. Ao delimitar a fronteira do sistema define-se a relevância do estudo, ou seja, o nível de aprofundamento do estudo. Por exemplo, ao analisar um transporte, devemos definir sua categoria (rodoviário, ferroviário, marítimo), dentro da categoria, pode-se escolher o combustível utilizado; é possível se aprofundar mais se forem levados em consideração o processo e as matérias-primas envolvidas na produção do combustível. As categorias de impactos se referem aos impactos que podem ser causados ao meio ambiente.

### **5.3.2 Análise de inventário**

Na análise de inventário é realizada a identificação quantificada de todas as interações entre o meio ambiente e o ciclo de vida do produto (SILVA, 2007). É nesta etapa que são realizadas a coleta e a quantificação das entradas e saídas do processo em estudo, a partir de dados primários, coletados direto de fonte, e secundários, da literatura.

Os dados coletados devem estar, em termos de abrangência e profundidade, de acordo com o que foi estabelecido anteriormente no objetivo e escopo. Devido à dificuldade na obtenção dos dados necessários, torna-se a etapa que demanda mais tempo e envolve um maior número de pessoas.

A ISO 14040 define algumas atividades que devem ser realizadas nesta etapa com o intuito de organizar a coleta de dados, como a construção de um diagrama de fluxo com todas as etapas do ciclo de vida, a definição e refinamento dos limites do sistema, dos procedimentos de cálculo e dos procedimentos de alocação.

### **5.3.3 Avaliação dos impactos de Ciclo de Vida**

A avaliação dos impactos é a etapa em que é realizada a identificação, caracterização e avaliação dos potenciais impactos ambientais associados aos aspectos ambientais levantados na etapa de análise de inventário.

Nesta etapa são determinadas as categorias de impactos que serão avaliadas no estudo, que incluem recursos abióticos, recursos bióticos, uso do solo, aquecimento global, destruição da camada de ozônio, impactos eco toxicológicos, toxicidade humana, formação de oxidantes fotoquímicos, acidificação, eutrofização e ambiente de trabalho.

Como uma ferramenta de apoio são utilizados alguns softwares, como o *SimaPro* que é basicamente um grande banco de dados contendo elementos comuns ao ciclo de vida de muitos produtos. No *SimaPro* podem ser encontrados registros de diversos processos e matérias-primas, que variam desde produtos químicos utilizados na produção do papel até o processo completo de geração de energia elétrica.

### **5.2.4 Interpretação**

Depois da avaliação dos impactos, é necessário interpretar os resultados obtidos de forma a torna-los mais simples de serem compreendidos. É importante ressaltar que nessa etapa devem ser levadas em consideração as hipóteses estabelecidas anteriormente, assim como as adaptações realizadas durante o estudo.

Nesta etapa, podem ser identificadas oportunidades de melhoria de desempenho ambiental de produtos e serviços, ou então, fazer comparações qualitativas e quantitativas de processos que exercem a mesma função.

## **6. ESTUDO**

### **6.1 Definição do objetivo e escopo**

#### **6.1.1 Objetivo do estudo**

A motivação desse estudo foi causada pelo aumento da geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil e a falta de opção com relação a sua destinação, uma vez que atualmente, predomina o uso de aterros sanitários. Com esta questão em mente, o objetivo foi avaliar o desempenho ambiental e identificar oportunidades de atenuar impactos causados pela incineração de um resíduo sólido urbano, uma vez que a mesma possui grande reprovação social. Como ciclo de vida, consideraram-se as etapas que se iniciam na planta de incineração, incluindo tratamento de gases, dos efluentes líquidos e a disposição final dos rejeitos. O estudo seguirá as normas descritas anteriormente no Item 4.2.4, estabelecidas por órgãos regulamentadores.

O mesmo poderá ser utilizado para comparações de impactos de cunho ambiental com outras tecnologias de incineração, ou ainda, outras formas de destinação final de resíduos sólidos urbanos.

Como público alvo, são inclusos todos que estiverem relacionados com destinação final de resíduos sólidos urbanos, principalmente entidades governamentais. Além disso, pode interessar também àqueles que se envolvem em negócios relacionados a tecnologias alternativas de geração de energia.

#### **6.1.2 Escopo do Estudo**

O processo de incineração tem como função tratar e dispor o resíduo, no caso, resíduo sólido urbano do município de Indaiatuba. Como unidade funcional, será adotada 1 tonelada de RSU de Indaiatuba. A função

Como cobertura geográfica, foi adotada a Região Metropolitana de Campinas, uma vez que a composição de RSU é referente a dados coletados na cidade de Indaiatuba.

Para a cobertura temporal, definiu-se o período entre 2004 e 2014, uma vez que os dados de composição do RSU foram coletados de um estudo realizado em 2004 e 2005 e os restantes dos dados serão os mais atuais que foi possível obter.

A cobertura tecnológica é representada pelo diagrama de blocos abaixo:

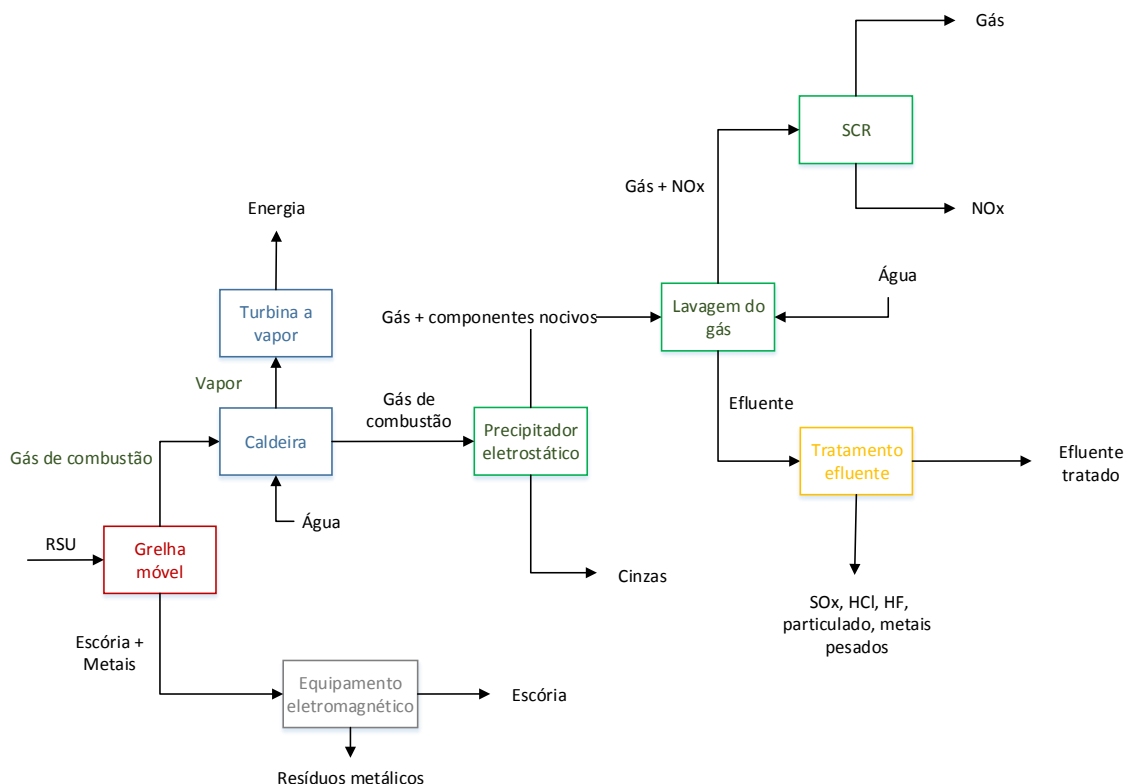


Figura 14: Diagrama de blocos do processo de incineração

Como é possível notar no diagrama, algumas escolhas de equipamentos e processos foram necessárias. A câmara de combustão escolhida foi a grelha móvel, por apresentar grande utilização no tratamento de RSU atualmente. Para a recuperação de energia, foi escolhida a turbina a vapor.

Quanto ao tratamento de gás, inicialmente será utilizado o precipitador eletrostático para retirada das cinzas, precedido da lavagem do gás e por fim o SCR (redução catalítica seletiva).

A lavagem do gás utiliza água e produz efluente líquido, necessitando tratamento do último. Para a escolha do processo de remoção de óxidos nitrosos, foi preferível a tecnologia SCR em relação ao SNCR, pois a SCR, apesar de seu custo elevado, necessita de menos amônia devido à presença de catalizador e remove maior quantidade de NOx em seu processo (IHS Global Spec).

## 6.2 Análise de inventário

Os dados de entrada que foram utilizados na simulação são provenientes do estudo de Mancini (2007), com os resíduos da cidade de Indaiatuba, no estado de

São Paulo. O estudo foi baseado na análise de 10 amostras de resíduos (mínimo de 144 kg cada), coletadas de setembro de 2004 a julho de 2005, para que fosse possível abranger diferentes épocas do ano e a sua influência na composição. Além disso, as amostras vinham de diferentes localizações geográficas dentro da cidade, a fim de englobar diversos níveis econômicos.

Classificaram-se os resíduos em 27 categorias: resíduo alimentício, resíduo de jardim, resíduo de banheiro, fralda descartável, embalagem feita a partir de mais de um material, embalagem longa vida, tecido, vidro, papel em boa condição, papel em péssima condição, aço, alumínio, bateria, calçado inteiro e reutilizável, polietileno de alta densidade (filme ou rígido), polietileno de baixa densidade (filme ou rígido), polipropileno (filme ou rígido), poliestireno (expandido ou rígido), PVC, PET (colorido ou incolor), resíduo de construção e outros.

Essas categorias foram escolhidas pela presença relativa e pelo potencial e princípios de reciclagem. Como exemplo, temos o papel em boa condição e péssima condição: o último possui mais impurezas e umidade, o que dificultaria sua reciclagem e incineração. A divisão dos plásticos foi feita baseada na composição, e depois, subdivididos em duas espessuras: filmes (até 250  $\mu\text{m}$  de espessura) e rígidos. Ambos os critérios são direcionados para a reciclagem. Plantas de reciclagem pagam até 20% a mais no PET incolor ao PET colorido.

Depois que os itens foram separados, cada tipo de resíduo era pesado e colocado em um container de volume conhecido. Assim, Mancini (2007) apresentou não apenas a composição mássica dos resíduos de Indaiatuba, mas também a volumétrica, conforme mostra a Tabela 7 abaixo.

Tabela 7: Classificação dos dados de resíduos que serão utilizados na simulação.

<b>Categoria</b>	<b>% mássica</b>
Resto de comida	40,1
Resíduo de jardinagem	13,6
Fraldas	3,6
Lixo de banheiro	3,6
Embalagem com mais de um material	1
Embalagem longa vida	1,1
Tecido	6,1

Vidro	1,9
Papel em boa condição	4,6
Papel em má condição	4,6
Aço	1,5
Alumínio	0,5
Baterias	0,1
Detritos	3,7
Sapatos	1,5
PEBD filme	2,3
PEBD rígido	0,1
PEAD filme	2,4
PEAD rígido	1,4
PP filme	0,9
PP rígido	0,4
EPS expandido	0,5
EPS rígido	0,9
PVC	0,7
PET incolor	0,8
PET colorido	0,3
Outros	1,8

(Fonte: Tabela Modificada - Mancini, 2007)

## 7. ADAPTAÇÃO DOS DADOS

O software *SimaPro* tem como função apenas dimensionar os impactos causados no meio ambiente, e para tal é necessário fornecer as entradas e saídas do sistema em estudo. Para definir as entradas e saídas, foi necessária a utilização de uma planilha Excel desenvolvida pelo *Ecoinvent Centre*, chamada "*Calculation Tool for waste disposal in Municipal Solid Waste Incinerators MSWI For ecoinvent v2.1 (2008)*". A planilha solicitava a inclusão da composição do RSU escolhido e adoção diversas premissas, que serão posteriormente explicitadas.

Como resultados, a planilha do *Ecoinvent* indicou como saídas as substâncias liberadas no processo de incineração e como entradas, os insumos necessários para o processo, principalmente no tratamento de gases, respeitando os limites de emissão. Com estes valores, foi possível iniciar as simulações no Software *SimaPro*.

O software *SimaPro* simula a incineração e apresenta alguns impactos ambientais dos subprocessos, tais como mudanças climáticas, depleção do solo, da água, acidificação do solo, entre outros.

A Figura 15 representa um esquema da sequência das atividades realizadas:

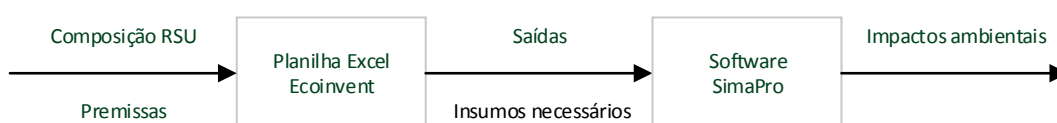


Figura 15: Esquema do uso de recursos computacionais para obtenção de resultados

Para a análise objetivada neste tipo de estudo, algumas hipóteses tiveram que ser adotadas de acordo com os dados disponíveis.

## 7.1 RSU

Na planilha *Excel* estava disponível alguns componentes usualmente encontrados no RSU, portanto foi necessário adaptar os dados de RSU obtidos anteriormente de modo que se ajustassem aos existentes. As categorias dos dados coletados foram alocadas aos componentes da planilha *Excel*, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: Adequação dos dados coletados com dados da planilha Excel

<b>Categoria</b>	<b>Componentes na planilha Excel (português)</b>	<b>Componentes na planilha Excel (inglês)</b>
Resto de comida	Produtos naturais	Natural products
Resíduo de jardinagem	Material compostável	Compostable material
Fraldas e lixo de banheiro	Fraldas	Diapers
Papel em boa / má	Papel médio	Average paper

condição		
Embalagem com mais de um material	Misto de vários plásticos / papel de embalagem	Mixed various plastics / Packaging paper
Embalagem longa vida	Embalagem laminada tetra bricks	Laminated packaging tetra bricks
Tecido	Tecidos	Textiles
Vidro	Vidro	Glass
Aço	Sucata de ferro	MSWI iron scrap
Alumínio	Alumínio	Alu in MSW
Baterias	Baterias	Batteries
Detritos	Material inerte	Inert material
Sapatos	Borracha / tecido	Rubber / Textiles
PEBD filme/rígido e PEAD filme/rígido	PE	PE
PP filme/rígido	PP	PP
EPS	OS	PS
PVC	PVC	PVC
PET incolor/colorido	PVC	PVC
Outros	Material residual médio de RSU	Average residual material from MSWI

Devido à falta de uma categoria “Alimentos” na tabela *Excel*, tal categoria foi alocada em “Produtos naturais” por apresentar características e composições semelhantes. Em “Embalagens com mais de um material” foram considerados dois componentes, “Misto de vários plásticos” e “Papel de embalagem”, atribuindo 50% de contribuição para cada componente. A categoria sapato foi alocada como borracha e tecido, sendo que foi considerada uma composição de 50% borracha e 50% tecido. Não foi realizada uma diferenciação entre materiais filme ou rígido e incolor ou colorido.

Com relação à capacidade de queima das substâncias considerou-se que ferro, alumínio, vidro e detritos são considerados inertes e, portanto, não queimáveis.



## 7.2 Insumos

Os insumos utilizados no processo, suas quantidades e concentrações, serão considerados conforme Tabela 9.

Tabela 9: Produtos químicos utilizados na planilha Excel

<b>Solução</b>	<b>Concentração (%)</b>	<b>Input g/kg RSU</b>
NaOH	30	7,00
CaO	95	6,00
HCl	30	0,04
FeCl <sub>3</sub>	40	0,10
TMT15	15	0,10
Polyelectrolyte	100	0,02

No entanto, algumas adaptações tiveram que ser realizadas ao inserir os dados de insumos no software *SimaPro*. As mesmas são reportadas abaixo na Tabela 10.

Tabela 10: Adaptações nos insumos

<b>Insumos na planilha Excel</b>	<b>Insumos no software <i>SimaPro</i></b>	<b>Insumos no software <i>SimaPro</i></b>
NaOH	Hidroxido de sódio, 50% em água, produção mista, na planta	Sodium hydroxide, 50% in H <sub>2</sub> O, production mix, at plant
CaO	Cal viva, moído, empacotado, na planta	Quicklime, milled, packed, at plant
HCl	Ácido clorídrico, 30% em água, na planta	Hydrochloric acid, 30% in H <sub>2</sub> O, at plant
FeCl <sub>3</sub>	Cloreto de ferro (III), 40% em água, na planta	Iron (III) chloride, 40% in H <sub>2</sub> O, at plant
TMT15	Químicos orgânicos, na planta	Chemicals organic, at plant
Polyelectrolyte	Químicos inorgânicos, na planta	Chemicals inorganic, at plant

### 7.3 Processo

Algumas condições com relação ao processo tiveram que ser adotadas.

- Volume de gás de combustão: 6 Nm<sup>3</sup> /kg RSU;
- Distância aproximada percorrida por caminhões para transporte de produtos químicos: 100 km;

### 7.4 Transporte

Como o RSU vem da cidade de Indaiatuba, foi considerada uma planta de incineração localizada na Região Metropolitana de Campinas, evitando assim o transporte do resíduo até a planta.

Para o caso dos insumos, foi estimada uma distância de 100 km percorrida por caminhões com capacidades maiores que 28t, transportando apenas um material por viagem.

### 7.5 Energia

Foi preciso adaptar a origem da produção energética de acordo com o cenário brasileiro para o ano de 2011, conforme apresentado na Tabela 11. O consumo de energia elétrica era recorrente principalmente na produção dos insumos utilizados no processo.

Tabela 11: Matriz energética do Brasil em 2011

<b>Fonte energia</b>	<b>%</b>
Carvão	2,33
Óleo	2,78
Gás	4,72
Biocombustível	6,06
Nuclear	2,94
Hidrelétrica	80,56
Vento	0,61

(Fonte: International Energy Agency, 2011)

Em relação à energia produzida pelo processo de incineração, foi necessário estabelecer qual seria sua utilidade final (transformação em energia térmica ou

elétrica) e a sua porcentagem de conversão. Tendo em vista a necessidade atual, tanto no Brasil como no mundo, de obter fontes alternativas de produção de energia elétrica, adotou-se que a energia produzida no processo de combustão seria utilizada para a produção de energia elétrica. A conversão considerada para o processo de transformação foi de 30%, dado baseado no estudo de Profu (2004). Esse número considera que uma parte da energia é utilizada para o próprio processo de incineração e que há perdas existentes nas conversões de energia térmica para mecânica e posteriormente em elétrica.

## 7.6 Infraestrutura

A simulação realizada pelo programa Excel inclui os processos e materiais utilizados na construção da planta de incineração com o intuito de contabilizar e incluir os impactos relacionados à infraestrutura no processo. Para que fosse possível avaliar seus impactos, algumas considerações foram realizadas, conforme tabela abaixo:

Tabela 12: Premissas da infraestrutura

<b>Dado considerado</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Tempo construção	4	Anos
Tempo operação	30	Anos
Tempo demolição	1	Anos
Área ocupada	10000	m <sup>2</sup>
RSU processado	301125 <sup>1</sup>	t/ano

<sup>1</sup> Valor calculado de acordo com o estudo realizado por URE Barueri, considerando 825 t/dia.

## 8. RESULTADOS

O processo de incineração foi dividido em alguns subprocessos, sendo os principais: a “Incineração” propriamente dita, os “Insumos” utilizados no processo de tratamento dos gases, “Cimento”, o “Transporte” realizado por caminhões, o “Gás natural” utilizado como energia térmica, “Dióxido de Titânio”, o “Compartimento de escória” e o “Material residual do aterro sanitário” que são os resíduos do processo e

as “Cargas do processo de incineração”, cargas estas que não variam com a composição do RSU.

O método ReCiPe midpoint utilizado para a análise do estudo oferece a avaliação de 18 diferentes categorias de impactos ambientais, sendo elas: Mudanças climáticas, Depleção da água, de metais, de fósseis, e de ozônio, Toxicidade humana, Radiação ionizada, Eco toxicidade de água fresca, marinha e terrestre, Formação de oxidantes fotoquímicos e de material particulado, Eutrofização de águas frescas e marítimas, Acidificação terrestre, Transformação de terras naturais, Ocupação de terras urbanas e agriculturáveis. O software acarreta a cada subprocesso uma porcentagem do impacto que causa.

Para uma melhor visualização, foram plotados os gráficos apresentando as categorias de impactos ambientais e os subprocessos responsáveis por cada impacto.

### **8.1 Mudanças Climáticas**

As mudanças climáticas estão fortemente relacionadas a emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera e possuem como unidade kg CO<sub>2</sub> equivalente, ou seja, converte-se o impacto causado por um subprocesso pelo impacto de uma determinada massa em quilos de CO<sub>2</sub>. A Figura 16 apresenta os principais subprocessos responsáveis pela mudança climática.

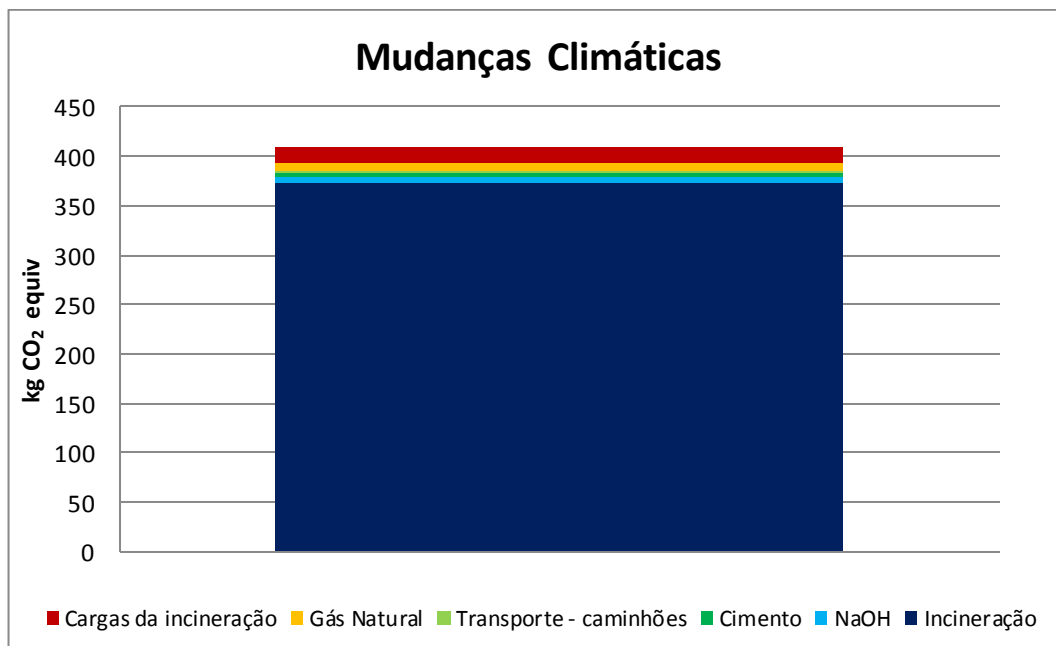


Figura 16: Mudanças Climáticas - Contribuição dos subprocessos

Na análise em questão, o subprocesso que mais impacta as mudanças climáticas é a incineração propriamente dita, seguida das cargas da incineração (emissões que independem da composição de RSU escolhida) e do gás natural, utilizado como combustível auxiliar. Um detalhamento do subprocesso de incineração com relação aos principais responsáveis pelas emissões é mostrado na Figura 17.

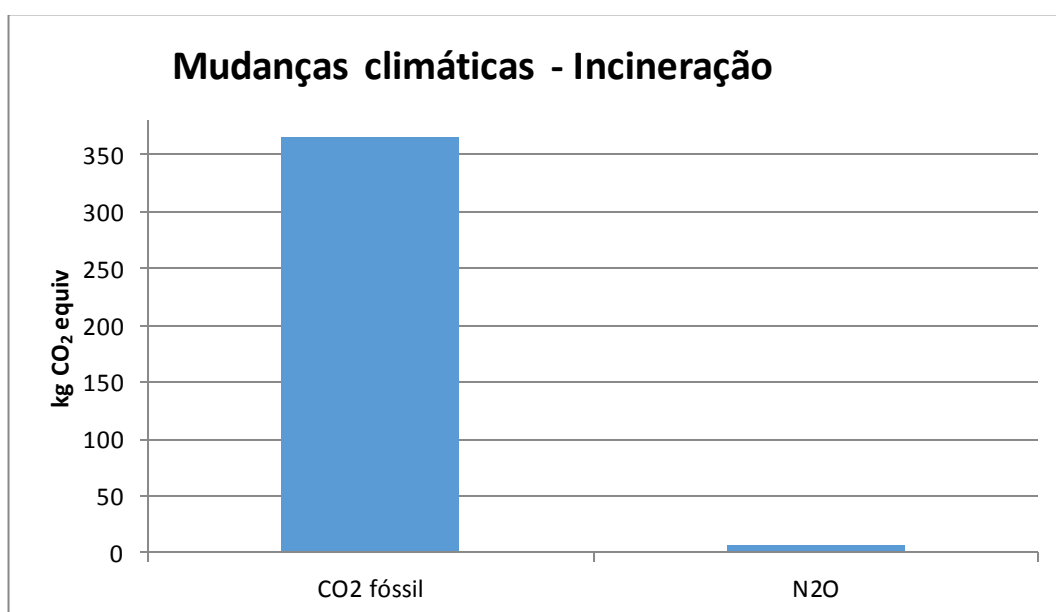


Figura 17: Subprocesso Incineração - Principais contribuintes

Pode-se verificar que o CO<sub>2</sub> fóssil é componente que mais contribui para que a incineração seja o grande responsável pelas mudanças climáticas (cerca de 360 kg CO<sub>2</sub> equivalente por tonelada de RSU). O N<sub>2</sub>O, embora seja o segundo maior contribuinte, possui contribuição muito menor (7 kg CO<sub>2</sub> equivalente por tonelada de RSU).

## 8.2 Depleção da Água

A água é um recurso natural limitado e escasso em diversas partes do mundo. No Brasil, atualmente, existe relativa preocupação em relação ao uso da mesma e incentivos de redução em consumidores de grande porte. Por isso, é importante considerar a depleção da água como um impacto ambiental do estudo.

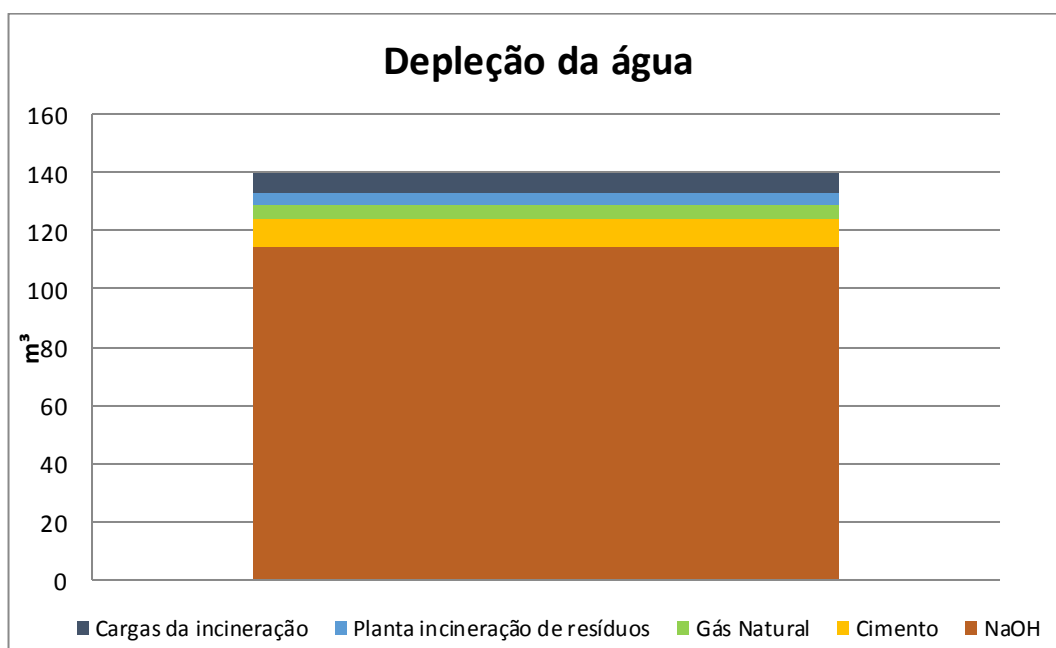


Figura 18: Depleção da água - Contribuição dos subprocessos

Como pode-se verificar pela Figura 18, a produção e o consumo de soda cáustica (NaOH) são os principais responsáveis pela alta depleção da água, cerca de 115 m<sup>3</sup> de água por tonelada de RSU incinerado. Em seguida, o cimento (9 m<sup>3</sup>), cargas da incineração (7 m<sup>3</sup>), e a planta de incineração (4 m<sup>3</sup>). A Figura 19 especifica a depleção da água causada pelos processos envolvidos na obtenção do NaOH.

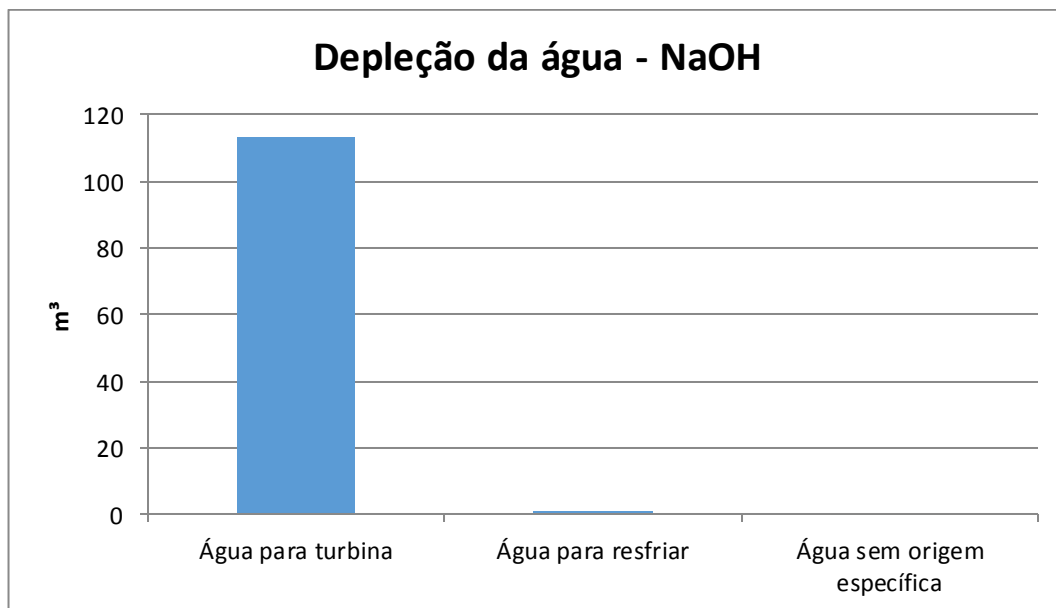


Figura 19: Subprocesso NaOH - Principais contribuintes

Observa-se que grande parte da água é utilizada para geração de energia elétrica em turbinas, uma vez que a produção de NaOH necessita de energia para realizar a eletrólise. A figura 19 representa o uso da água no processo de NaOH, quase totalmente para turbinas.

### 8.3 Oxidante Fotoquímico

Reações químicas que envolvem hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio, sendo o último emitido por combustão em indústrias ou veículos, na presença de luz solar, formam oxidantes fotoquímicos, principalmente ozônio. O ozônio tem sua função de extrema importância na estratosfera, no entanto, em camadas mais baixas (troposfera) é tóxico à plantas, causando grandes danos a culturas agrícolas e vegetações nativas (CETESB). Assim, será considerada a formação de oxidantes fotoquímicos, medido por kg de NMVOC (*Non-methane volatile organic compounds*: compostos orgânicos voláteis que excluem o metano).

Abaixo, na Figura 20, há a indicação dos subprocessos que influenciam na formação de oxidantes fotoquímicos.

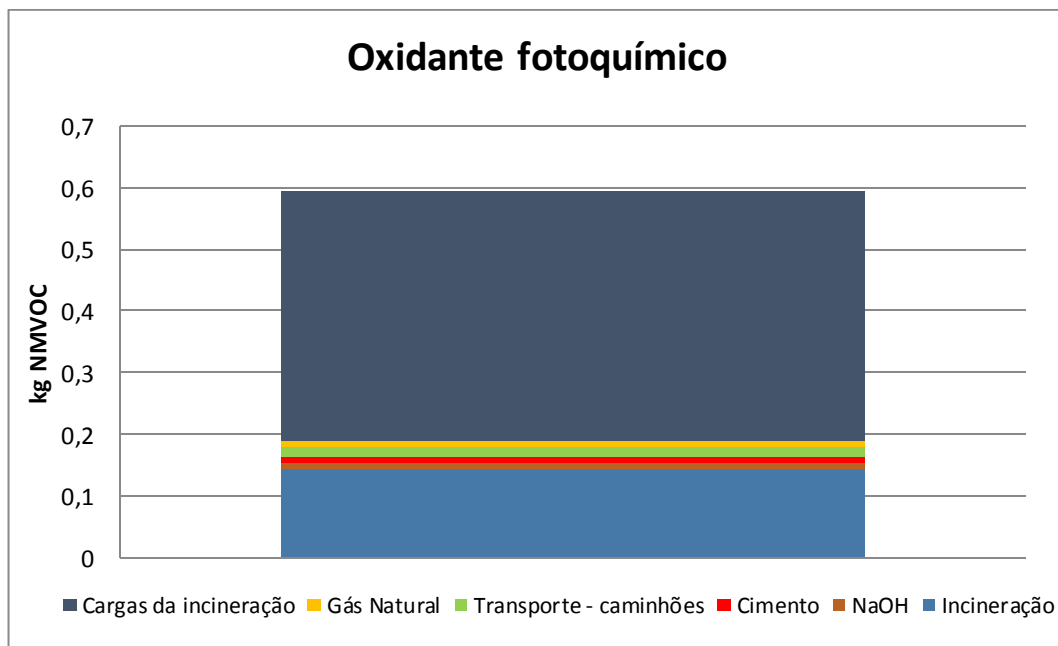


Figura 20: Formação de Oxidantes Fotoquímicos - Contribuição dos subprocessos

Os principais responsáveis são as cargas da incineração, seguido da incineração propriamente dita e transporte dos insumos por caminhões.

A Figura 21 apresenta os principais compostos para que o subprocesso carga da incineração seja o que mais contribua na formação de oxidantes fotoquímicos.

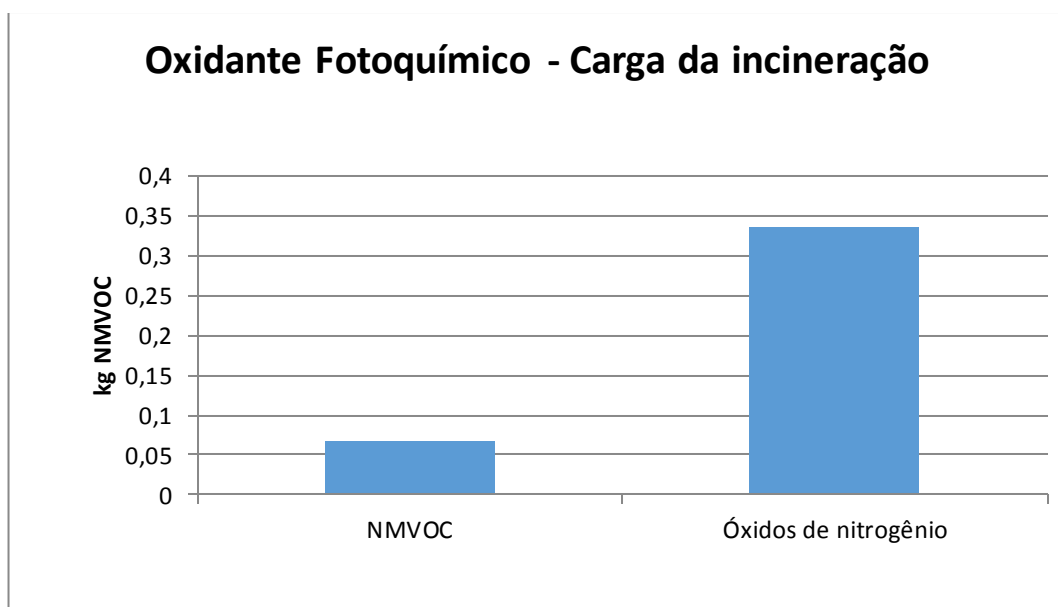


Figura 21: Subprocesso Carga da incineração - Principais contribuintes



As substâncias que mais contribuem para o impacto em questão são: os óxidos de nitrogênio representando 0,335 kg NMVOC por tonelada de RSU incinerado e os NMVOC, responsável pela emissão de 0,067 kg.

#### 8.4 Formação de Material Particulado

Os materiais particulados finos com diâmetros menores que 10  $\mu\text{m}$ , representam uma complexa mistura de substâncias orgânicas e inorgânicas. Estas partículas se inaladas podem causar diferentes problemas de saúde. A Figura 22 apresenta os principais subprocessos responsáveis pela emissão de material particulado no ar.

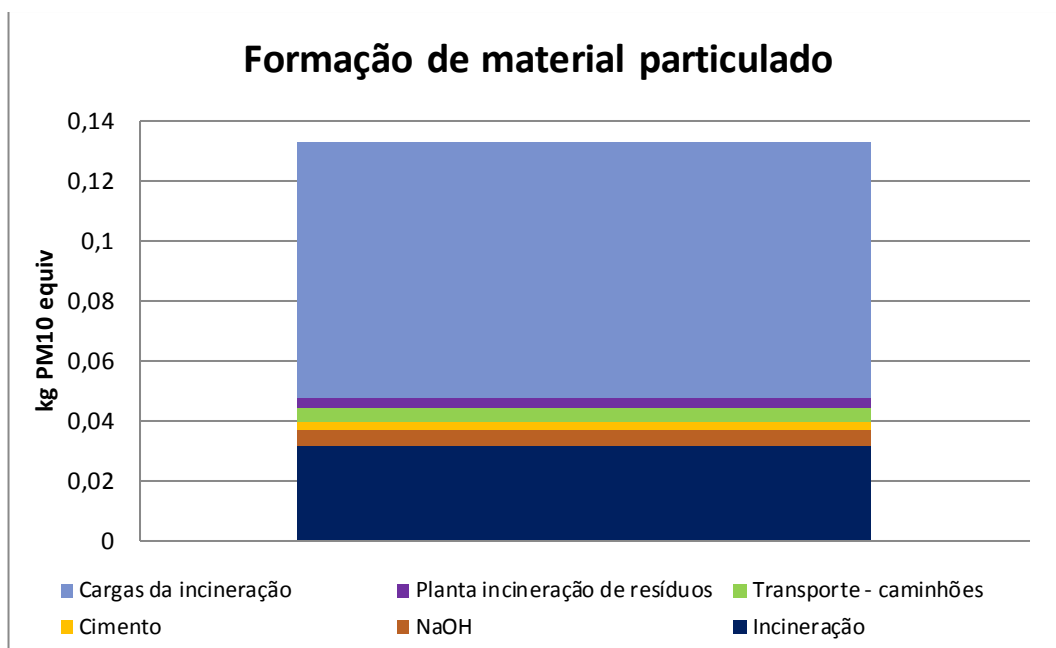


Figura 22: Formação de Material Particulado - Contribuição dos subprocessos

Analisando os subprocessos, nota-se que os maiores responsáveis pela emissão de materiais particulados são as cargas e o próprio processo de incineração. Uma análise mais detalhada pode ser realizada com os dados apresentados na Figura 23, que apresenta as substâncias presentes no processo de incineração, responsáveis pela emissão estudada.

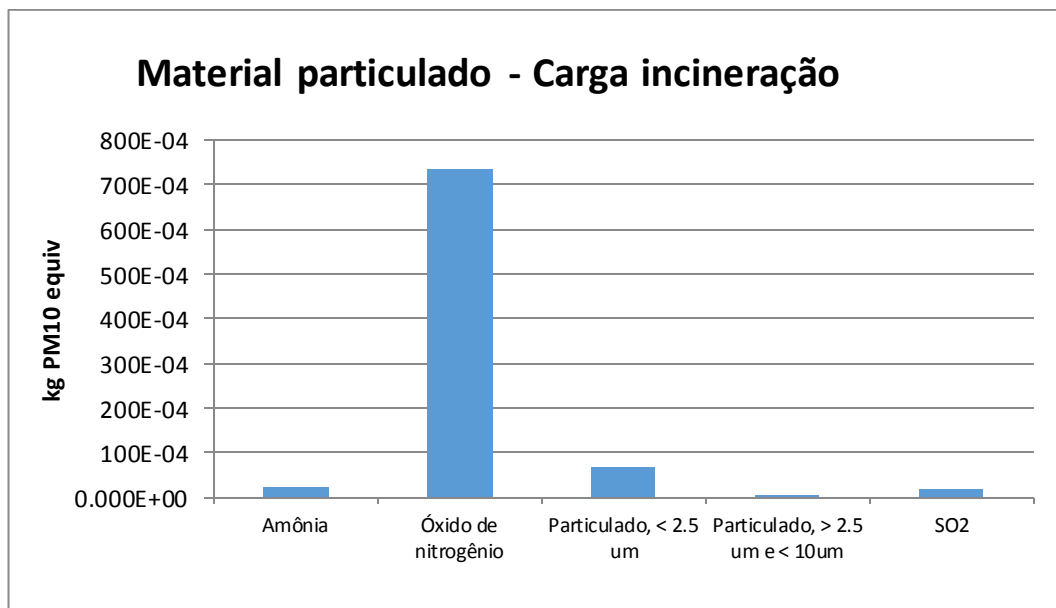


Figura 23: Subprocesso Carga da incineração - Principais contribuintes

O principal responsável é o óxido de nitrogênio emitido ao ar, que leva à formação de aerossóis de materiais particulados finos. A emissão de particulados de tamanhos menores que 2,5  $\mu\text{m}$  também apresentam uma grande participação nas emissões.

### 8.5 Acidificação Terrestre

Deposições atmosféricas de substâncias inorgânicas, como sulfatos, nitratos, e fosfatos, causam mudanças na acidez do solo. Para quase todas as espécies de plantas há uma definição de acidez ótima. Um grande desvio deste valor é prejudicial a estas plantas e é referido como acidificação. A Figura 24 apresenta os responsáveis pela acidificação terrestre.

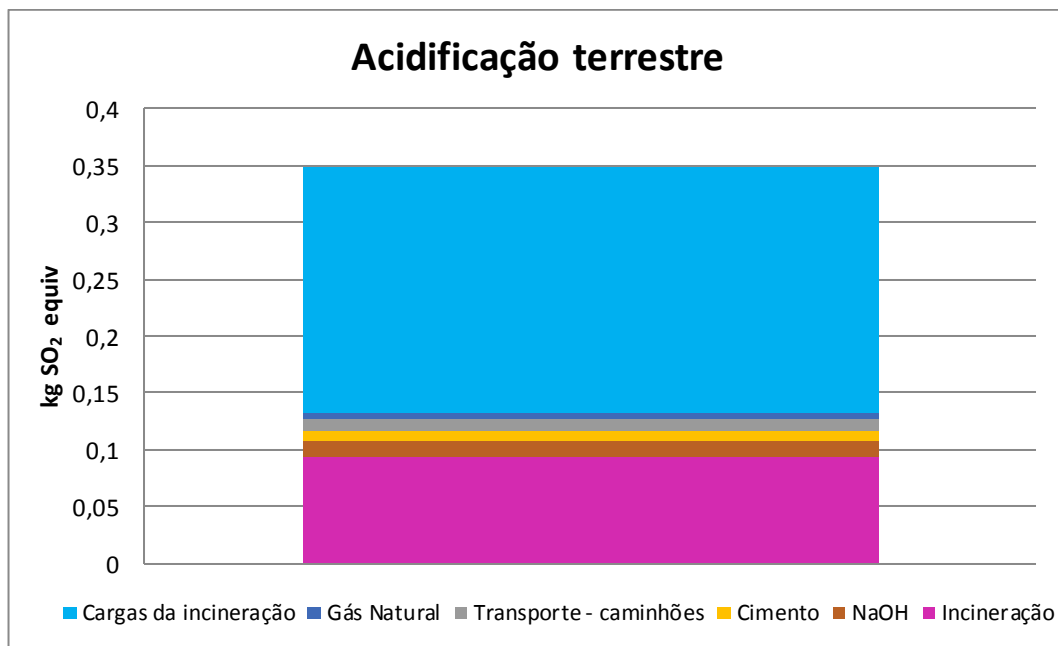


Figura 24: Acidificação terrestre - Contribuição dos subprocessos

Verifica-se que o principal responsável pelo impacto em estudo, é a carga da incineração seguido da incineração representando aproximadamente 90% das emissões. A Figura 25 apresenta o detalhamento das emissões relacionadas à incineração responsáveis pela acidificação terrestre.

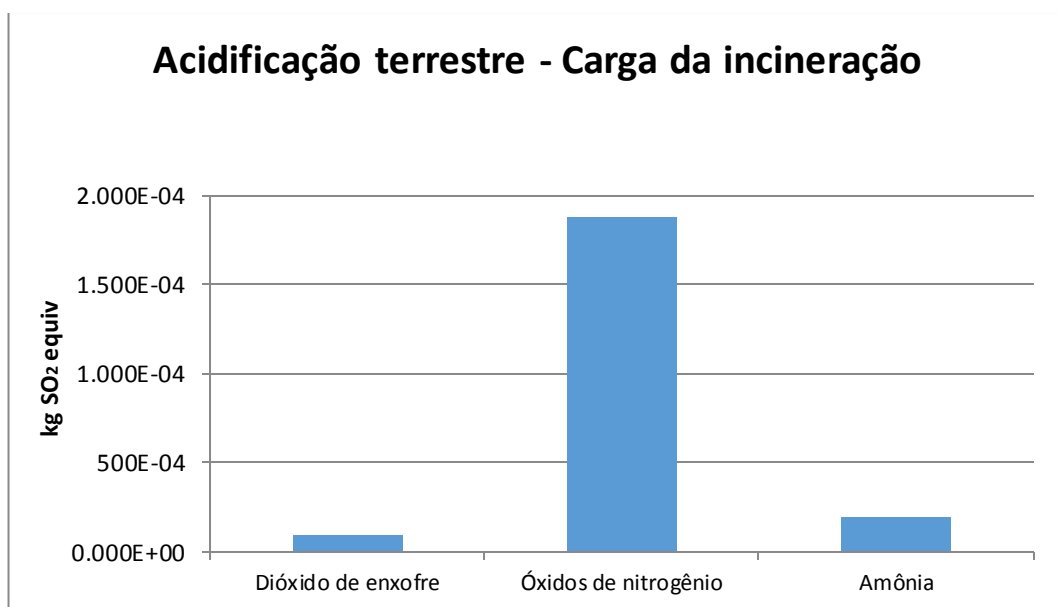


Figura 25: Subprocesso Carga da incineração - Principais contribuintes

O maior responsável pela acidificação terrestre são as emissões de óxido de nitrogênio, juntamente com emissões de amônia de dióxidos de enxofre.

## 8.6 Ocupação de terras urbanas

A categoria de impacto “ocupação de terras” reflete o dano ao ecossistema devido aos efeitos de ocupação e transformação da terra, considerando a quantidade ocupada e o tempo de ocupação. Os principais responsáveis pelo impacto são apresentados na Figura 26.

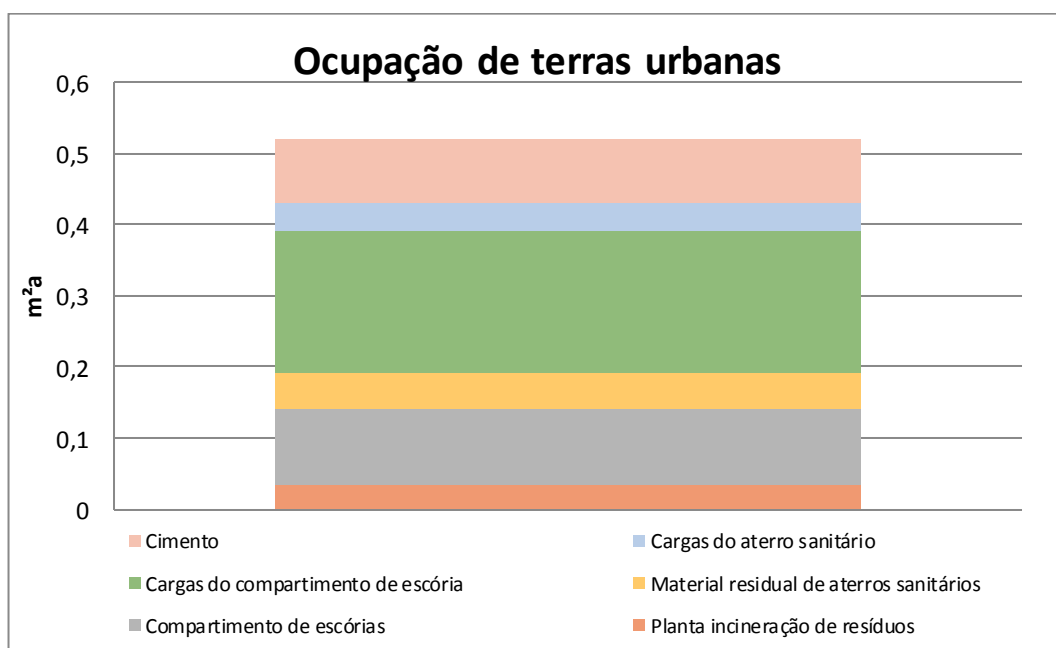


Figura 26: Ocupação de Terras Urbanas - Contribuição dos subprocessos

Esta categoria de impacto apresenta contribuições mais homogêneas entre os principais subprocessos, sendo o maior responsável a carga do compartimento de escória, seguidas pelo compartimento de escória e o cimento.

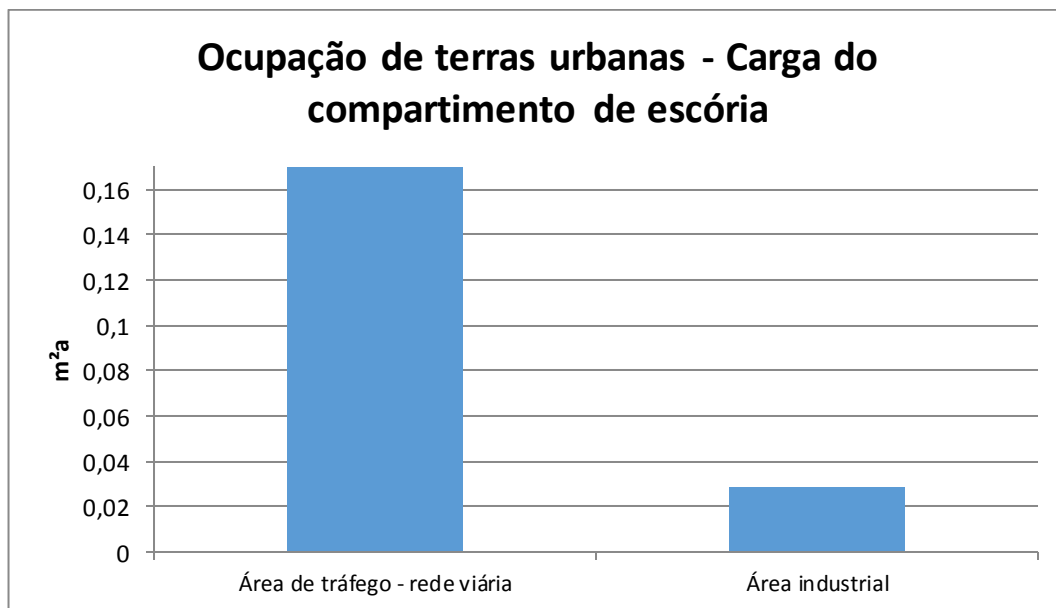


Figura 27: Subprocesso Carga do compartimento de escória - Principais contribuintes

Os principais responsáveis pelo impacto associado ao compartimento de escória são a área de tráfego e a área industrial, ambas relacionadas à ocupação urbana.

## 9. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após analisar os resultados dos principais responsáveis pelos impactos ambientais, é possível verificar que há uma grande contribuição dos óxidos de nitrogênios em diversos impactos, apesar de a incineração apresentar um processo responsável pelo tratamento dos mesmos (processo SCR). A fim de diminuir a emissão de óxidos de nitrogênio, sugere-se estudar melhor os processos de tratamento e adotar uma tecnologia mais eficaz com relação à remoção de tal componente.

O subprocesso relacionado ao transporte de insumos por caminhões também se mostrou relevante nos impactos ambientais devido principalmente à emissão de dióxido de carbono. No entanto, vale ressaltar que as distâncias consideradas no estudo foram estimadas, podendo claramente apresentar desvios em relação aos valores reais. O mesmo poderia apresentar menor participação nos impactos se houvesse menos dependência com o transporte rodoviário, substituindo-o pela rede ferroviária ou então utilizando caminhões mais eficientes (menos poluidores).

A soda cáustica foi outro subprocesso que contribuiu com os impactos negativos. Pelo fato de estar associada à remoção de  $\text{SO}_2$  na lavagem dos gases, é um grande responsável pela depleção da água. Uma alternativa seria a utilização de um processo que não necessita de água no tratamento dos gases.

## 10. CONCLUSÃO

Esse Trabalho de Conclusão de Curso, cujo título adotado é '*Avaliação do ciclo de vida da incineração de um resíduo sólido urbano*', cumpriu seu objetivo, uma vez que o mesmo visava avaliar o desempenho de uma planta de incineração localizada na região metropolitana de Campinas e identificar melhorias no desempenho ambiental da mesma.

A partir da composição do resíduo sólido urbano do município de Indaiatuba, SP, retirado de um estudo conduzido por Mancini (2007), e com o auxílio do software SimaPro, de uma planilha Excel desenvolvida pela empresa Ecoinvent foi possível obter a quantificação dos impactos ambientais e seus principais responsáveis.

Alguns resultados eram esperados, como o fato de que o próprio subprocesso da incineração é o principal responsável por alguns dos impactos ambientais. No entanto, o estudo surpreendeu em categorias de impacto cujos subprocessos com maior participação nos impactos eram relacionados à produção de insumos ou ao transporte.

Algumas oportunidades de melhorias foram apontadas, porém é necessária uma análise mais aprofundada caso os resultados sejam utilizados para a modificação de processos. Com o intuito de um melhor entendimento dos impactos causados no meio ambiente é válido realizar uma comparação com outro processo com características e funções similares como, por exemplo, o processo de disposição de resíduos em aterros sanitários.

## 11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos No Brasil**, 2012. Disponível em <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2012.pdf>>. Acesso em 15 Jul. 2014.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos Sólidos – Classificação**, 2004. Disponível em: <<http://www.aslaa.com.br/legislacoes/NBR%20n%2010004-2004.pdf>>. Acesso em 8 Dez. 2013.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Bioindicador vegetal para ozônio troposférico**. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/vegetacao/36-ozonio-troposferico>>. Acesso em 17 Ago 2014.

CEWEP – CONFEDERATION OF EUROPEAN WASTE-TO-ENERGY PLANTS. **Map of European Waste-to-Energy plants, 2011**. Disponível em: <[http://cewep.eu/information/data/studies/m\\_1224](http://cewep.eu/information/data/studies/m_1224)>. **Map of European Waste-to-Energy plants in 2001**. Disponível em: <[http://cewep.eu/information/data/studies/m\\_299](http://cewep.eu/information/data/studies/m_299)>.

DEMPSEY, C.R; OPPELT, E.T. **Incineração de resíduos perigosos: uma revisão crítica**, 1999.

GARABRANT, D. H., et al. **The University of Michigan dioxin exposure study: predictors of human serum dioxin concentrations in Midland and Saginaw, Michigan. Environ. Health Perspect.**, v. 112, n. 5, p. 818-824, 2009. – Disponível em<<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/laboratorios/fit/Dioxinas-e-furanos.pdf>>. Acesso 17 Jul. 2014.

GOEDKOOP, M., HEIJUNGS, R., HUIJBREGTS, M., SCHRYVER, A. D., STRUIJS, J., ZELM, R. V. **ReCiPe - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level.** Ed. 1, 2013.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa nacional de saneamento básico.** Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb/lixo\\_coletado/lixo\\_coletado110.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb/lixo_coletado/lixo_coletado110.shtm)>. Acesso em 9 Nov. 2013

IHS Global Spec. **Selective Catalytic Reduction (SCR) Systems Information.** Disponível em: <[http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing\\_process\\_equipment/air\\_quality/selective\\_catalytic\\_reducers\\_scr](http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/air_quality/selective_catalytic_reducers_scr)>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Brazil: Electricity and Heat for 2011.** Disponível em: <<http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=BRAZIL&product=electricityandheat&year=2011>>. Acesso em 01 Ago. 2014

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Environmental Management –Life cycle assessment: Principles and framework – ISO 14.040.** Genebra: ISO, 2004.

MANCINI, S.D., NOGUEIRA, A.R., KAGOHARA, D.A., SCHWARTZMAN, J.A.S., MATTOS, T. **Recycling potential of urban solid waste destined for sanitary landfills: the case of Indaiatuba, SP, Brazil.** Waste Management & Research 25: 517-523. 2007.

MCDUGALL, F.R., WHITE, P.R., FRANKE, M., HINDLE, P. **Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory.** 2 ed. Oxford: Blackwell Science Ltd, 2001. Pag 1.



MELO, G. C. B. **Tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia**. Disponível em <[http://www.abes-mg.org.br/arquivos/site/cursos\\_e\\_seminarios/apresentacao-gilberto-caldeira.pdf](http://www.abes-mg.org.br/arquivos/site/cursos_e_seminarios/apresentacao-gilberto-caldeira.pdf)>. Belo Horizonte, 2013. Acesso em 20 Mai. 2014.

MENEZES, R. A. A., GERLACH, J. L., e MENEZES, M. A. **Estágio atual da incineração no Brasil**. ABLP – Associação Brasileira de Limpeza Pública VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública. Curitiba, 2000.

PROFU. **Evaluating waste incineration as treatment and energy recovery method from an environmental point of view**. Mölndal, Suécia, 2004. Disponível em <[http://cewep.eu/media/cewep.eu/org/med\\_454/173\\_profustudy.pdf](http://cewep.eu/media/cewep.eu/org/med_454/173_profustudy.pdf)>. Acesso em 22 Jun. 2014.

PROGRAMA DE PESQUISAS EM SANEAMENTO BÁSICO. **Alternativas de disposição de Resíduos Sólidos Urbanos para pequenas comunidades**. Florianópolis – SC, 2003.

SECRETARIA DO ESTADO DO MEIO AMBIENTE. **Resolução SMA-079, de 04 de novembro de 2009**. Disponível em: <[http://www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/resolucao/2009/2009\\_res\\_est\\_sma\\_79.pdf](http://www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/resolucao/2009/2009_res_est_sma_79.pdf)>. Acesso em 09 Jul. 2014.

SILVA, G. A. da. **Avaliação do ciclo de vida**. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/noticias/2007/10/gil.pdf>>. Acesso em 9 Nov. 2013

URE – UNIDADE DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA BARUERI. **Transformando resíduos em energia**. Disponível em <<http://www.urebarueri.com.br/Institucional%20URE%20Barueri.pdf>>. Acesso 25 Jun. 2014.

WORLD BANK. **Municipal solid waste incineration**. Washington, 1999. Disponível em: <[http://www.worldbank.org/urban/solid\\_wm/erm/CWG%20folder/Waste%20Incineration.pdf](http://www.worldbank.org/urban/solid_wm/erm/CWG%20folder/Waste%20Incineration.pdf)>. Acesso em 09 Mar. 2014.