

**DANIEL GOIS VILELA**

**Avaliação do ciclo de vida da incineração de resíduos sólidos urbanos e fixação de gás carbônico em microalgas para produção de biocombustíveis**

**São Paulo**

**2014**

**DANIEL GOIS VILELA**

**Avaliação do ciclo de vida da incineração de resíduos sólidos urbanos e fixação de gás carbônico em microalgas para produção de biocombustíveis**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo**

**Área de Concentração: Grupo de  
Prevenção da Poluição**

**Orientador: Prof. Dr. Gil Anderi da Silva**

**São Paulo**

**2014**

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Gil Anderi da Silva pela orientação e por tornar possível a realização deste trabalho. Ao professor José Luiz de Paiva pelo apoio em diferentes momentos da graduação. Ao Alex do GP2 pelo auxílio voluntário de grande importância na realização deste trabalho.

A toda a família que sempre foi suporte para todos os momentos, sonhos e objetivos traçados, presença constante nos momentos de felicidade e também nos mais difíceis, fonte de inspiração na minha busca por tornar o mundo melhor com um pequeno ato de cada vez.

À minha mãe e ao meu pai pelas grandes pessoas que são, por todo o amor e carinho, por propiciarem um ótimo ambiente para minha formação pessoal e pelos grandes exemplos que são para mim.

Aos amigos Fábio, Felipe, Leandro, Lucas, Márcio, Nasser e Rafael, sem os quais a graduação não teria sido a mesma, nos melhores e piores aspectos. A todos os demais colegas também pelos grandes momentos vividos.

À Associação de Engenharia Química, a AEQ, pelo ótimo ambiente, excelente energia e grandes pessoas. À Poli Jr, pela ajuda na formação profissional.

## RESUMO

A avaliação do ciclo de vida é uma análise elaborada para analisar todos os impactos ambientais de produtos, processos ou serviços. A partir dela é possível analisar e comparar diferentes processos, como exemplo, o tratamento de resíduos. A gestão de resíduos sólidos urbanos apresenta um complicado cenário no Brasil, sendo que boa parte do lixo doméstico produzido não tem o devido descarte em aterros sanitários. Nesse cenário, a incineração de resíduos sólidos urbanos se mostra como uma oportunidade para redução dos impactos ambientais relacionados à má gestão dos mesmos, além de uma forma de produzir energia elétrica, recuperando o conteúdo energético desses resíduos. Apesar de preconceito ambiental em relação à incineração dos resíduos, os estudos para tratamento de emissões ao meio ambiente estão muito avançados, e é possível realizar a incineração minimizando o impacto ao meio ambiente. Porém esses tratamentos em questão não visam reduzir a quantidade de dióxido de carbono lançado para a atmosfera, e sim dos componentes tóxicos ou prejudiciais à saúde humana ou ao ecossistema. Como forma de se reduzir as emissões de dióxido de carbono para a atmosfera, as microalgas se apresentam como uma grande ferramenta para a fixação desse gás que é um dos principais causadores do efeito estufa. A partir do dióxido de carbono dissolvido em meio aquático e com a certa alimentação de nutrientes, as algas apresentam alta taxa de crescimento, e com o alto teor de lipídios presentes em determinadas espécies, tornando-se possível a exploração da biomassa criada para a produção de biocombustíveis. A partir do sistema que compreende a incineração de resíduos sólidos urbanos com aproveitamento energético, a fixação de parte do gás carbônico produzido em microalgas e produção de biodiesel a partir da biomassa gerada, análises comparativas de impacto ambiental foram feitas com base nos sistemas atuais mais comuns para tratamento de resíduos sólidos urbanos, produção de energia e de óleo diesel. Como resultado o sistema proposto apresentou menores impactos ambientais em relação aos sistemas comuns, sendo 85% menos impactante que o sistema com aterro sanitário e biodiesel da soja, e 23% menos impactante que o sistema com aterro sanitário e diesel do petróleo.

## ABSTRACT

The life cycle assessment was designed to analyze all the environmental impacts of products, processes or services. By its use it is possible to analyze and compare different processes, for example, waste treatment. The municipal solid waste management in Brazil presents a complicated scenario, given that most of the household waste produce does not have its right disposal in sanitary landfills. In this scenario, the municipal solid waste incineration may be considered as an opportunity to reduce the environmental impacts related to poor waste management, as well as a way of electricity production by the recovery of energy content on waste. Although there is environmental prejudice against waste incineration, there are advance studies on emissions treatment to the environment, and it is possible to incinerate waste minimizing the impact to the environment. But these treatments in question are not intended to reduce the amount of carbon dioxide released into the atmosphere, but only components that are toxic or harmful to human health and ecosystem. As a way to reduce carbon dioxide emissions to the atmosphere, microalgae is provided as a great tool for fixing this major greenhouse effect gas. Using the carbon dioxide dissolved in an aqueous environment and the right supply of nutrients algae have high growth rate, and so the high content of lipids present in certain species makes it possible to exploit the created biomass for production of biofuels. From the system which includes municipal solid waste incineration with energy recovery, partial fixation of emitted carbon dioxide in microalgae and biodiesel production from generated biomass, comparative environmental impact analyzes were made based on most common systems for municipal solid waste treatment, energy and diesel production. As a result the proposed system showed lower environmental impact compared to common systems, 85% less impact than the system with landfill and soybean biodiesel and 23% less impact than the system with landfill and petroleum diesel.

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Comparação de impactos entre aterro sanitário e incinerador .....	34
Gráfico 2: Comparação de impactos entre aterro sanitário com energia complementar e incinerador .....	36
Gráfico 3: Comparação de impactos entre aterro com energia, incinerador e incinerador com fixação de CO <sub>2</sub> .....	37
Gráfico 4: Comparação de impactos entre biodiesel de microalgas, biodiesel de soja e petrodiesel .....	39
Gráfico 5: Comparação de impactos entre biodiesel de microalgas e biodiesel de microalgas com benefícios da incineração .....	40
Gráfico 6: Comparação de impactos entre biodiesel de microalgas e biodiesel de microalgas com benefícios, biodiesel da soja e petrodiesel .....	41
Gráfico 7 : Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 1 sem sinergia .....	43
Gráfico 8: Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 2 com biodiesel de soja .....	44
Gráfico 9 : Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 2 com petrodiesel .....	45
Gráfico 10: Comparação de impactos entre sistema 1, sistema 1 com biodiesel e sistema 1 com petrodiesel.....	47
Gráfico 11: Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 2 com biodiesel de soja pelo método Endpoint .....	48
Gráfico 12 : Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 2 com petrodiesel pelo método Endpoint .....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Elementos de processo da incineração de RSU.....	19
Tabela 2: Parâmetros para modelo matemático de crescimento de microalgas .....	24
Tabela 3: Inventário do Incinerador.....	28
Tabela 4: Inventário do cultivo de microalgas .....	29
Tabela 5: Inventário da produção de biodiesel de microalgas .....	30
Tabela 6: Inventário do Incinerador.....	32
Tabela 7: Inventário do cultivo de microalgas .....	32
Tabela 8: Inventário da produção de biodiesel de microalgas .....	33
Tabela 9: Comparação de impactos entre aterro sanitário e incinerador.....	35
Tabela 10: Comparação de impactos entre aterro sanitário com energia complementar e incinerador.....	36
Tabela 11: Comparação de impactos entre aterro com energia, incinerador e incinerador com fixação de CO <sub>2</sub> .....	38
Tabela 12: Comparação de impactos entre biodiesel de microalgas, biodiesel de soja e petrodiesel.....	39
Tabela 13: Comparação de impactos entre biodiesel de microalgas e biodiesel de microalgas com benefícios da incineração .....	41
Tabela 14: Comparação de impactos entre biodiesel de microalgas e biodiesel de microalgas com benefícios, biodiesel da soja e petrodiesel .....	42
Tabela 15 : Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 1 sem sinergia .....	43
Tabela 16 : Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 2 com biodiesel de soja .....	45
Tabela 17: Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 2 com petrodiesel .....	46
Tabela 18: Comparação de impactos entre sistema 1, sistema 1 com biodiesel e sistema 1 com petrodiesel.....	47
Tabela 19: Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 2 com biodiesel de soja pelo método Endpoint.....	49
Tabela 20: Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 2 com petrodiesel pelo método Endpoint .....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS

RSU: Resíduos Sólidos Urbanos  
ACV: Avaliação de Ciclo de Vida  
CO2: Dióxido de Carbono  
DQO: Demanda Química de Oxigênio  
DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio  
PCI: Poder Calorífico Interior  
MC : Mudança Climática  
MCH : Mudanças Climáticas para Humanidade  
MCE : Mudanças Climáticas para Ecossistem  
DO : Depleção do Ozônio  
AS : Acidificação de Solo  
EAD : Eutrofização de Água Doce  
EM : Eutrofização Marinha  
TH : Toxicidade Humana  
FFO : Formação de Oxidantes Fotoquímicos  
FMP : Formação de Material Particulado  
ETT : Ecotoxicidade Terrestre  
ETAD : Ecotoxicidade de Água Doce  
ETM : Ecotoxicidade Marinha  
RI : Radiação Ionizante  
OAA : Ocupação de Áreas Agrícolas  
OAU : Ocupação de Áreas Urbanas  
TAN : Transformação de Áreas Naturais  
ESA : Esgotamento de Água  
ESM : Esgotamento de Metais  
ESCF : Esgotamento de Combustíveis Fósseis

## ÍNDICE

RESUMO .....	4
Introdução .....	11
1. Objetivos .....	12
1.1. Objetivo Geral .....	12
1.2. Objetivos Específicos .....	12
2. Revisão Bibliográfica .....	13
2.1. Avaliação de Ciclo de Vida .....	13
2.1.1. Definição .....	13
2.1.2. Estrutura .....	13
2.1.3. Métodos .....	15
2.2. Resíduos Sólidos Urbanos .....	16
2.3. Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos .....	17
2.3.1. Incineração .....	17
2.3.2. Tratamento de Resíduos Sólidos .....	19
2.3.3. Tratamento de Emissões Gasosas .....	19
2.3.4. Tratamento de Efluentes Líquidos .....	20
2.3.5. Impacto Socioambiental .....	20
2.4. Microalgas .....	21
2.4.1. Tipos de Produção .....	21
2.4.2. Produção de Biodiesel .....	23
2.4.3. Produção de Etanol .....	23
2.4.4. Modelos matemáticos de microalgas .....	23
3. Modelagem da incineração de RSU com fixação do CO <sub>2</sub> em microalgas .....	25
3.1. Contextualização .....	25
3.2. Fluxograma do processo .....	26
3.3. Entrada e saídas do incinerador .....	28
3.4. Modelagem matemática das microalgas .....	29
3.5. Produção de biodiesel .....	30
4. Avaliação do Ciclo de Vida .....	31
4.1. Definição do objetivo e escopo .....	31
4.2. Definição dos sistemas de produto .....	31
4.3. Análise do Inventário .....	32
4.4. Resultados e Discussão .....	33

4.4.1. Comparação entre métodos de tratamento.....	34
4.4.2. Comparação entre obtenção de diesel.....	38
4.4.3. Análise de Sinergia.....	42
4.4.4. Comparação entre sistemas (Midpoint).....	44
4.4.5. Comparação entre Sistemas (Endpoint).....	48
5. Conclusão.....	52
6. Recomendações.....	53
7. Referências Bibliográficas.....	54

## Introdução

Com o aumento das populações urbanas e do conseqüente aumento da produção de lixo, o tratamento de resíduos torna-se um problema para muitas metrópoles em função da gestão ambiental e exigências a serem cumpridas. Como maiores problemas destacam-se o espaço necessário para a deposição dos resíduos, da ordem de milhares de toneladas por dia, custos com a preparação de terrenos, impermeabilização e tratamento de lixiviados, proliferação de doenças em função do contato do lixo com animais e com a própria população de baixa renda residente em áreas próximas.

Dado o complexo cenário envolvido no tratamento dos resíduos urbanos, a incineração acompanhada pela produção de energia elétrica se destaca como uma solução para todos os problemas apresentados, pois pode reduzir o volume de lixo produzido em até 95%, além de o produto final estar em estado inerte, eliminando riscos de proliferação de doenças e impactos químicos no solo (Giere et al., 2004). Com a incineração é possível reaproveitar resíduos ferrosos presentes nas cinzas com o auxílio de eletroímãs, e a principal vantagem é a produção de energia elétrica que pode ser incorporada à rede de distribuição, sendo que o consumo estimado é de apenas 10% do total gerado.

As microalgas por sua vez são vistas já há algum tempo como a solução para a reposição dos combustíveis não renováveis, em função do alto teor lipídico que pode ser obtido pelas microalgas e do altíssimo índice de produção por área, muito maior que qualquer plantação voltada para a produção de combustível apresenta. (Alabi et al., 2009). Porém a produção de microalgas apresentam problemas que impedem a competição financeira com combustíveis de origem fóssil. Alguns desses problemas são: a contaminação do cultivo por outras espécies indesejadas e bactérias, altos custos de secagem (teor de massa por volume muito baixo) e custos com nutrientes.

As tecnologias de incineração de resíduos sólidos urbanos e da produção de biocombustíveis a partir de microalgas (em menor escala) já são utilizadas em países como Estados Unidos, Japão e China. Ambas encontram barreiras, sendo a financeira a principal para as microalgas e a ambiental para a incineração. No caso do Brasil o preconceito ambiental com a incineração é a principal causa do baixo uso de tal processo na gestão do lixo, em função da falsa percepção social que poluentes serão emitidos para o ar (todas as emissões são tratadas, sendo mais limpas que a de lixões e aterros controlados) (Zakon et al., 2002). Os macroprocessos apresentam soluções um para o outro que podem torná-los de maior interesse ambiental e econômico, apresentando soluções para o meio ambiente que serão abordadas neste estudo.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo Geral**

A proposta do trabalho é propor e analisar um novo processo que contemple o tratamento de resíduos sólidos urbanos com recuperação energética e produção de biocombustível, por meio do estudo de dois processos já existentes, a incineração de RSU e a produção de microalgas com fixação de gás carbônico.

### **1.2. Objetivos Específicos**

Estudar a incineração de resíduos sólidos urbanos, e suas vantagens e desvantagens em relação à opção do aterro sanitário. Estudar geração de energia, entrada e saída de compostos e demais implicações do método de tratamento dos resíduos sólidos urbanos.

Estudar o cultivo de microalgas, condições ideais para crescimento, limitações do sistema e condições de alimentação, produção de biocombustíveis e outros fatores que influenciem no seu crescimento.

Levantar todas as possibilidades de integração das duas tecnologias em questão, e aproveitar todas as formas positivas de interação entre os dois processos. Por fim, criar um modelo de processo de incineração de RSU com fixação do CO<sub>2</sub> em microalgas e produção de biocombustíveis que seja de possível aplicação para o atual cenário brasileiro.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. Avaliação de Ciclo de Vida

#### 2.1.1. Definição

A Avaliação de Ciclo de Vida é uma técnica para se analisar os aspectos e potenciais impactos associados a um produto, processo ou serviço (EPA, 2006). Para realizar a avaliação do ciclo de vida é necessário:

- Compilar um inventário das entradas de energia e recursos, e as emissões para o meio ambiente
- Avaliar o impacto potencial ao meio ambiente associado com as entradas e emissões identificadas
- Interpretar os resultados para auxiliar em uma decisão melhor informada

A ACV é uma avaliação do “berço ao túmulo” para se analisar os sistemas em questão. A ACV avalia todos os estágios de vida de um produto da perspectiva de que todos eles são interdependentes, ou seja, que uma operação leva a outra. ACV permite que se estime o impacto ambiental acumulado resultante de todos os estágios de ciclo de vida de um produto, frequentemente incluindo impactos não considerados em outros tipos de análises, como exemplos a extração de matéria prima, transporte de materiais e descarte do produto final. Por incluir os impactos ao longo de todo o ciclo de vida, a ACV fornece uma visão mais abrangente de todos os aspectos ambientais do produto ou processo, e um retrato mais preciso do verdadeiro peso de escolha de produtos e processos.

#### 2.1.2. Estrutura

O processo da ACV é sistemático e dividido em quatro componentes: definição do objetivo/escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação:

- Definição de Objetivos e Escopo – Definir e descrever o produto, processo ou atividade. Estabelecer o contexto em que a avaliação será feita, identificar fronteiras e efeitos ambientais a serem inspecionados para a avaliação

- Análise de inventário – Identificar e quantificar o uso de energia, água e recursos e emissões para o meio ambiente (por exemplo, emissões para a atmosfera, efluentes líquidos e disposição de resíduos sólidos)
- Avaliação de Impacto – Avaliar os efeitos potenciais humanos e ecológicos do uso de energia, água e recursos e das emissões para o meio ambiente
- Interpretação – Interpretar os resultados da análise de inventário e avaliação de impactos para selecionar um produto, processo ou serviço preferencial, com o claro entendimento da incerteza e das premissas consideradas para gerara os resultados.

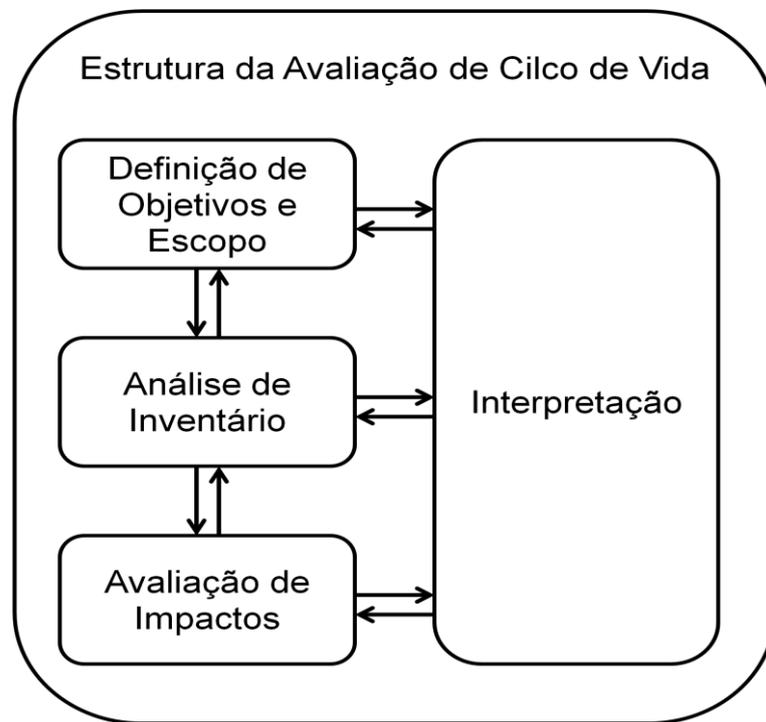


Ilustração 1: Estrutura da Avaliação de Ciclo de Vida

### 2.1.3. Métodos

A Avaliação de Ciclo de Vida pode ser realizada por vários métodos diferentes, com diferentes indicadores, categorias de impacto e formas de cálculo.

Um dos métodos para realização da ACV é o ReCiPe (Goedkoop et al., 2009). O método em questão compreende dois grupos de categorias de impacto, cada um com um conjunto de fatores de caracterização.

A análise de Midpoint é um método com pouca incerteza, mais aceito e utilizado em pesquisas científicas, contemplando 18 categorias de impactos:

- Mudança climática
- Depleção de ozônio
- Acidificação do solo
- Eutrofização fluvial
- Eutrofização marítima
- Toxicidade humana
- Formação de oxidantes fotoquímicos
- Formação de material particulado
- Ecotoxicidade terrestre
- Ecotoxicidade fluvial
- Ecotoxicidade marinha
- Radiação ionizante
- Ocupação de áreas agrícolas
- Ocupação de áreas urbanas
- Transformação de áreas naturais
- Esgotamento de água
- Esgotamento de recursos minerais
- Esgotamento de combustíveis fósseis

A análise de Endpoint é um método com maior incerteza baseado em modelos mais específicos, e conta com três categorias principais:

- Danos à saúde humana
- Danos à diversidade do ecossistema
- Danos à disponibilidade de recursos.

Os dois métodos mencionados possuem suas vantagens e desvantagens. A análise de Midpoint possui um grau menor de incerteza, como já mencionado, e fornece uma análise mais abrangente e detalhada dos impactos causados por um determinado sistema. Em função dessas características é o método

mais aceito e usado em pesquisas. Já o método de Endpoint possui um grau maior de incerteza, pois é baseado em modelos próprios dos desenvolvedores do ReCiPe. A vantagem de seu uso é a normalização em pontos que permite que cada sistema avaliado tenha um total de pontos, permitindo a comparação de sistemas em suas totalidades, e não apenas a comparação por categorias.

## 2.2. Resíduos Sólidos Urbanos

Resíduos sólidos, segundo a norma NBR 10004:2004, são resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Também se incluem nessa 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.

Conforme Lei nº 12.305, os resíduos sólidos urbanos são classificados quanto à origem da seguinte forma:

- a) Resíduos Domésticos: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) Resíduos de Limpeza Urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;

Para fazer um diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) de 2005 considerou uma amostragem que envolveu todos os municípios brasileiros acima de 3 milhões de habitantes - mas apenas 2% daqueles abaixo de 30.000 habitantes - em que a presença de lixões é predominante (Ministério do Meio Ambiente).

Os lixões são depósitos a céu aberto onde não há controle de chorume, poluente de elevada DBO. Perde-se ainda o gás metano gerado na fermentação, de elevado potencial de aquecimento global. Nesses depósitos, há ainda problemas decorrentes da presença de animais como ratos - que representam perigos à saúde - e urubus - que constituem risco às aeronaves, quando os depósitos se localizam próximos a aeroportos.

Existem iniciativas bem-sucedidas na reciclagem de materiais como latas de alumínio e vidros, mas a destinação da matéria orgânica permanece, em geral, uma questão mal equacionada. Os RSU no Brasil são ricos em matéria orgânica - cerca de 50% a 60% - o que ofereceria oportunidades importantes na geração de energia e na compostagem, em vez da solução geralmente aceita, que é a disposição em aterros sanitários.

Em países desenvolvidos, as diretrizes são opostas, pois o Landfill Directive da União Européia (UE) já recomendava a redução drástica do envio

de materiais biodegradáveis para aterros sanitários até o ano de 2006, com o objetivo de erradicar totalmente o aterramento desses materiais. Na UE, a potência instalada a partir de RSU em 2000 era de 8.800 MW (8.8 GW).

O uso para outras fins de áreas antes utilizadas como aterros sanitários é problemático - pois as emissões de metano podem perdurar até por cem anos, criando problemas de segurança.

## **2.3. Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos**

### **2.3.1. Incineração**

A incineração é usada como um tratamento para uma grande variedade de resíduos. A incineração é comumente apenas uma parte de um complexo sistema de tratamento que, em seu conjunto, lida com a gestão de toda a gama de resíduos gerados pela sociedade (European Commission, 2006).

O setor da incineração passou por um desenvolvimento tecnológico acelerado pelos últimos 10 a 15 anos. Boa parte dessas mudanças foi em razão de legislações específicas para a indústria, de forma que fossem reduzidas as emissões gasosas individuais. Um desenvolvimento contínuo do processo vem ocorrendo, com o setor sendo capaz de desenvolver tecnologias que limitem os custos enquanto mantém ou melhoram o desempenho ambiental.

O objetivo da incineração de resíduos, em comum com a maioria de outros tratamentos, é tratar os resíduos para reduzir seu volume e perigo, capturando ou destruindo substâncias potencialmente nocivas. Os processos de incineração também são meios de recuperação de energia e minerais dos resíduos.

A incineração é a oxidação de materiais combustíveis contidos nos resíduos. Os resíduos em geral são altamente heterogêneos, sendo formado principalmente por substâncias orgânicas, minerais, metais e água. Durante a incineração, serão formados gases de combustão que vão conter a maior parte da energia na forma de calor. As substâncias orgânicas nos resíduos irão queimar quando tiverem atingido a temperatura de ignição e se estiverem em contato constante com oxigênio. No caso do poder calorífico dos resíduos e o fornecimento de oxigênio serem suficientes, o cenário leva a uma reação térmica em cadeia e combustão autossuficiente, não sendo necessária a adição de outros combustíveis.

Embora o tratamento térmico de resíduos seja uma forma de reduzir o impacto ambiental, existem ameaças potenciais nos casos de processos ou

emissões mal controladas. As diferentes formas de impactos estão listadas abaixo:

- Emissões gasosas e líquidas (incluindo odor)
- Produção de resíduos
- Vibração e poluição sonora do processo
- Produção e consumo de energia
- Consumo de matéria-prima
- Emissões dos resíduos armazenados
- Redução dos riscos de deposição e processamento de resíduos

Todos os resíduos que não são separados pela população para a coleta seletiva serão destinados para a unidade de incineração. Os resíduos serão mantidos em uma grande fossa por um período adequado para a perda parcial de umidade, sendo que este espaço deverá ser suficiente para armazenamento de produções de pico. O local para recepção dos resíduos deve ser mantido a pressões negativas para evitar a propagação de odores.

Os sistemas de recuperação de energia consistem em uma produção comum para o ramo de energia, que ocorre por meio do aquecimento de uma caldeira de água e produção de vapor. O vapor irá acionar um sistema de turbinas para a produção de energia elétrica.

Do total produzido de energia estima-se que 10% serão utilizados pela própria unidade, enquanto os 90% restantes podem ser transferidos à rede elétrica.

De acordo com o IBGE a produção de lixo pela população brasileira é de 1.1 kg por habitante por dia. Dado que uma tonelada de resíduos pode produzir a mesma energia que 250 kg de petróleo, caso todo o lixo doméstico do município de São Paulo (cerca de 12 milhões de habitantes) fosse incinerado, a energia produzida seria equivalente à de 3300 toneladas de petróleo, ou convertendo, 22575 barris de petróleo ao dia (EPE, 2008).

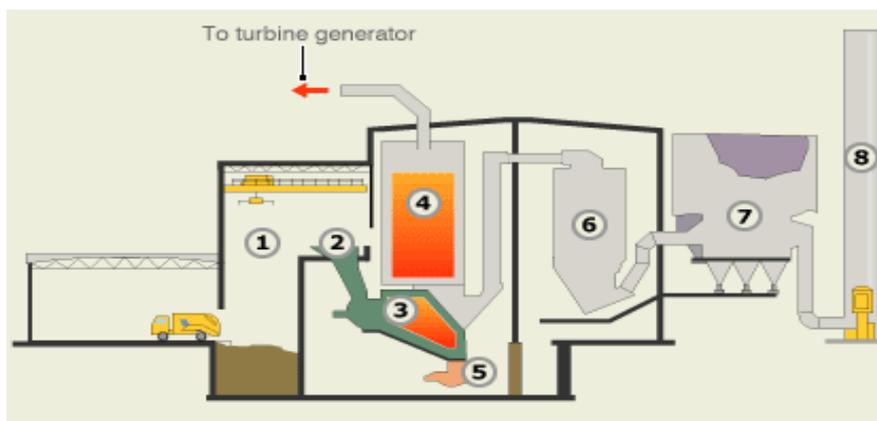


Ilustração 2: Representação da incineração de RSU

**Tabela 1: Elementos de processo da incineração de RSU**

1	Área de Espera
2	Garras
3	Câmara de Incineração
4	Caldeira
5	Coleta de Cinzas
6	Câmara de Tratamento
7	Remoção de Material Particulado
8	Chaminé

### **3.3.2. Tratamento de Resíduos Sólidos**

O processo de incineração resulta em diversos subprodutos, cujos tratamentos podem ser divididos para os materiais sólidos, gasosos e líquidos.

No caso dos resíduos sólidos as cinzas provenientes do incinerador são transportadas por esteiras, e durante o transporte uma esteira com eletroímãs é responsável pela separação de materiais ferrosos, enquanto o restante das cinzas será inertizado e depositado em aterro sanitário (cerca de 5% do volume inicial).

### **3.3.3. Tratamento de Emissões Gasosas**

O tratamento de emissões gasosas é o que envolve maior preocupação ambiental e conseqüentemente maior rigor técnico. Os principais contaminantes presentes no gás resultante da incineração são as dioxinas e furanos, gases ácidos, compostos nitrogenados, demais compostos orgânicos, metais e partículas em suspensão.

As dioxinas e furanos são compostos produzidos principalmente com a queima de produtos plásticos e são altamente tóxicos para a população. Assim como outros compostos voláteis, a sua produção é minimizada em função da alta temperatura em que o processo é conduzido, porém ainda é necessário o uso de carvão ativado para a retenção de qualquer quantidade acima da permitida. O carvão ativado também servirá para conter possíveis compostos metálicos presentes nas emissões gasosas.

Quanto aos demais contaminantes, as partículas podem ser retiradas com ciclones e filtros de manga, os gases ácidos por meio de borbulhamento em solução básica e os compostos nitrogenados por redução com injeção de amônia.

Todas as emissões após os devidos tratamentos são monitoradas para que estejam dentro dos limites estabelecidos. Como os resíduos sólidos urbanos podem não apresentar uniformidade, os limites trabalhados são abaixo dos valores permitidos pelas leis ambientais.

#### **3.3.4. Tratamento de Efluentes Líquidos**

Além das partículas sólidas e gasosas é necessário o tratamento dos efluentes líquidos resultantes da remoção das cinzas, dos lavadores de gases, das torres de resfriamento e dos lixiviados dos aterros sanitários (em menor quantidade que aterros comuns, porém também presentes).

Para o tratamento dos efluentes são utilizados tanques que conduzem diferentes processos, dentre eles a nitrificação, no qual o objetivo é a redução do nitrogênio amoniacal e a desnitrificação que resulta na produção de nitrogênio gasoso, gás carbônico e água. A maioria dos processos de tratamento de efluentes líquidos ocorre com o auxílio de bactérias.

#### **3.3.5. Impacto Socioambiental**

Apesar de todas as emissões da unidade de incineração serem exaustivamente medidas para cumprir a legislação ambiental, é de interesse para a manutenção do processo um programa de monitoração externo junto às populações residentes em áreas próximas.

Devem ser feitas amostragens e análises do ar, água e solos agrícolas, medições de ruído e análise de culturas de vegetais e animais próximas, além da análise de outros possíveis aspectos de saúde pública e psicossociais.

## 2.4. Microalgas

### 2.4.1. Tipos de Produção

Existem três principais métodos para o cultivo de microalgas, por meio de raceways, fotobiorreatores ou fermentadores. Os raceways são grandes tanques de pouca profundidade com pás para mistura e movimento do meio. Tem como vantagens a facilidade de implementação e baixo custo, e como desvantagens a fácil contaminação do meio por outras espécies e bactérias e a dificuldade de controle dos parâmetros de operação. (Alabi et al., 2009)

Os fotobiorreatores consistem em meios fechados, normalmente em tubos horizontais ou verticais feitos de vidro ou plástico transparente que permita a passagem de luz. São mais caros para se implementar e podem sofrer de superaquecimento por não trocarem calor de forma eficiente com o ar. As grandes vantagens são a possibilidade de controlar parâmetros como temperatura, entrada de nutrientes entre outros, e a possibilidade de se usar uma variedade maior de espécies de microalgas, já que não haverá competição com possíveis contaminantes.

Fermentadores são para o cultivo heterotrófico das microalgas. Substratos orgânicos são utilizados como fonte de energia em vez de utilizarem luz e CO<sub>2</sub>. A desvantagem é a que não haverá fixação de carbono, porém as microalgas podem apresentar maiores teores de lipídios em sua composição e o cultivo pode ser realizado em períodos noturnos. O cultivo mixotrófico (combinação de fotoautotrófico com heterotrófico) também apresenta grande potencial, pois juntaria vantagens de ambos métodos.



**Ilustração 3: Cultivo de microalgas pelo método de raceways**



**Ilustração 4: Cultivo de microalgas pelo método de fotobiorreatores**

### **2.4.2. Produção de Biodiesel**

Em função do alto teor lipídico que as microalgas podem conter as tornam um grande potencial para a produção de biodiesel, também por grande parte desses lipídios ser formada por triacilgliceróis que apresentam boas propriedades para a produção de biodiesel. (Alabi et al., 2009)

Existem várias formas para realizar a colheita e extração do óleo das microalgas, sendo que para a secagem as técnicas mais comuns são de filtração, floculação e centrifugação, enquanto para obtenção do óleo a massa obtida com cerca de 80% de teor de umidade é colocada em um óleo quente e depois centrifugada, formando três camadas, óleo, água e massa algal. Após a separação de lipídios os mesmos são transesterificados para a produção de biodiesel.

### **2.4.3. Produção de Etanol**

A massa algal restante após o processo de separação de lipídios é rica em amido e pode ser utilizada para a produção de etanol. O processo é semelhante ao de produção de etanol do milho, a enzima celulase será usada para quebrar as cadeias grandes de açucares que serão então fermentados para a produção de etanol.

### **2.4.4. Modelos matemáticos de microalgas**

Os parâmetros mais importantes para regular o crescimento de microalgas são a temperatura, quantidade de nutrientes e qualidade, intensidade de luz, nível de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>, pH e a salinidade (Thorton et al., 2010). A temperatura ótima para a cultura de microalgas é geralmente entre 20°C e 30°C. Como as microalgas são organismos fotossintéticos é necessário que o meio de cultivo tenha suficiente iluminação para promover a fotossíntese. Quanto maior for a irradiação solar, maior será o tempo que as microalgas podem ficar sem luz e sem perder massa.

A partir do modelo de crescimento de microalgas limitado pela incidência de luz (Huisman et al, 2002), é possível chegar a um modelo dependente de nutrientes, temperatura e densidades intra e extracelulares (Thornton et al., 2010). Dessa forma, o seguinte modelo pode ser obtido:

$$\begin{aligned}\dot{\mathcal{A}} &= \alpha_{\mathcal{A}} f_m(M) S - (D_r + h_0) \mathcal{A}, \\ \dot{M} &= -k_2 \alpha_{\mathcal{A}} f_m(M) S + I_m(t), \\ \dot{S} &= \alpha_s C - k_3 \alpha_{\mathcal{A}} f_m(M) S - (D_r + h_0) S, \\ \dot{C} &= -k_1 \alpha_s C + I_c(t).\end{aligned}$$

As variáveis utilizadas nas equações estão listadas na tabela abaixo

Tabela 2: Parâmetros para modelo matemático de crescimento de microalgas

Parâmetro	Unidade	Descrição
<b>A</b>	$\text{g.m}^{-3}$	Concentração de biomassa seca
<b>M</b>	$\text{g.m}^{-3}$	Concentração de nutrientes
<b>fm(M)</b>	$\text{g.m}^{-3}$	Concentração de nutrientes dentro das células
<b>S</b>	$\text{g.m}^{-3}$	Concentração de glicose
<b>C</b>	$\text{g.m}^{-3}$	Concentração de dióxido de carbono
<b>lc</b>	$\text{g.m}^{-3}.\text{dia}^{-1}$	Entrada de dióxido de carbono
<b>lm</b>	$\text{g.m}^{-3}.\text{dia}^{-1}$	Entrada de nutrientes
<b>Dr</b>	$\text{dia}^{-1}$	Taxa relativa de morte das microalgas
<b>h0</b>	$\text{dia}^{-1}$	Taxa relativa de colheita das microalgas
<b><math>\alpha_a</math></b>	$\text{g}^{-1}.\text{dia}^{-1}$	Taxa constante de crescimento de biomassa
<b><math>\alpha_s</math></b>	$\frac{\text{g}(\text{CH}_2\text{O})}{6.\text{g}(\text{CO}_2)}.\text{dia}^{-1}$	Taxa constante de fotossíntese
<b>k1</b>	Adim	Taxa de conversão de CO2 em glicose
<b>k2</b>	adim	Taxa de conversão de nutrientes em biomassa
<b>k3</b>	adim	Taxa de conversão de glicose em biomassa

A partir do modelo proposto e cálculos realizados, temos que o valor esperado de concentração de microalga é de 6g de biomassa/m<sup>3</sup> de água. A quantidade média fixada de gás carbônico nas microalgas é de 1,8g para cada 1g de biomassa formado (Doucha et al, 2005). Porém, para se manter a concentração de dióxido de carbono no meio é necessário realizar constante dissolução de gás. Como parte desse gás carbônico volta à atmosfera à medida que sua pressão parcial sobe, é necessária uma entrada de 4,4g de dióxido de carbono para que 1,8 g seja consumido na formação de 1g de biomassa. Dessa forma, pode-se estimar a eficiência do gás carbônico em microalgas em torno de 41%, considerando os períodos em que a temperatura esteja dentro da faixa ótima para fotossíntese e que haja suficiente incidência de luz.

### **3. Modelagem da incineração de RSU com fixação do CO<sub>2</sub> em microalgas**

#### **3.1. Contextualização**

A incineração de RSU é uma técnica aplicada vastamente na gestão de resíduos, inclusive em países de matriz energética composta principalmente por energias renováveis (EC, 2006). É um processo utilizado há mais de 30 anos e com constantes melhorias nos processos de tratamento de emissões. O tratamento de emissões é a parte que mais acarreta em custos, e na qual a maior parte das pesquisas da área é feita.

Dentro das possíveis formas de auxílio no tratamento de emissões, este trabalho estuda a possibilidade do uso de microalgas para fixação do gás carbônico e redução nas emissões de gases nocivos à atmosfera. Dentre esses gases nocivos estão o monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio. Para evitar a possibilidade de que o sistema produza emissões gasosas além das permitidas pela legislação, será considerado que os gases alimentados no cultivo de microalgas já estão dentro das especificações necessárias para emissão, sendo as reduções de emissões analisadas apenas pelo ponto de vista de redução de impacto ambiental.

### 3.2. Fluxograma do processo

O processo proposto de incineração de resíduos com fixação de microalgas segue demonstrado a seguir:

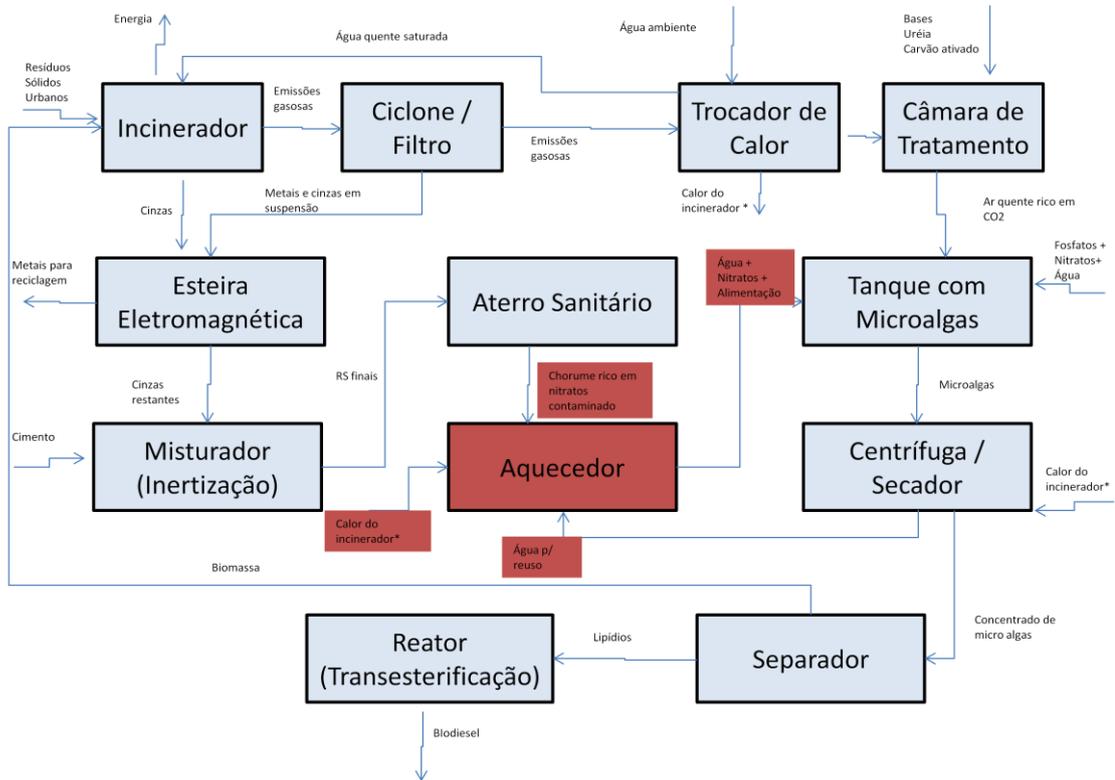
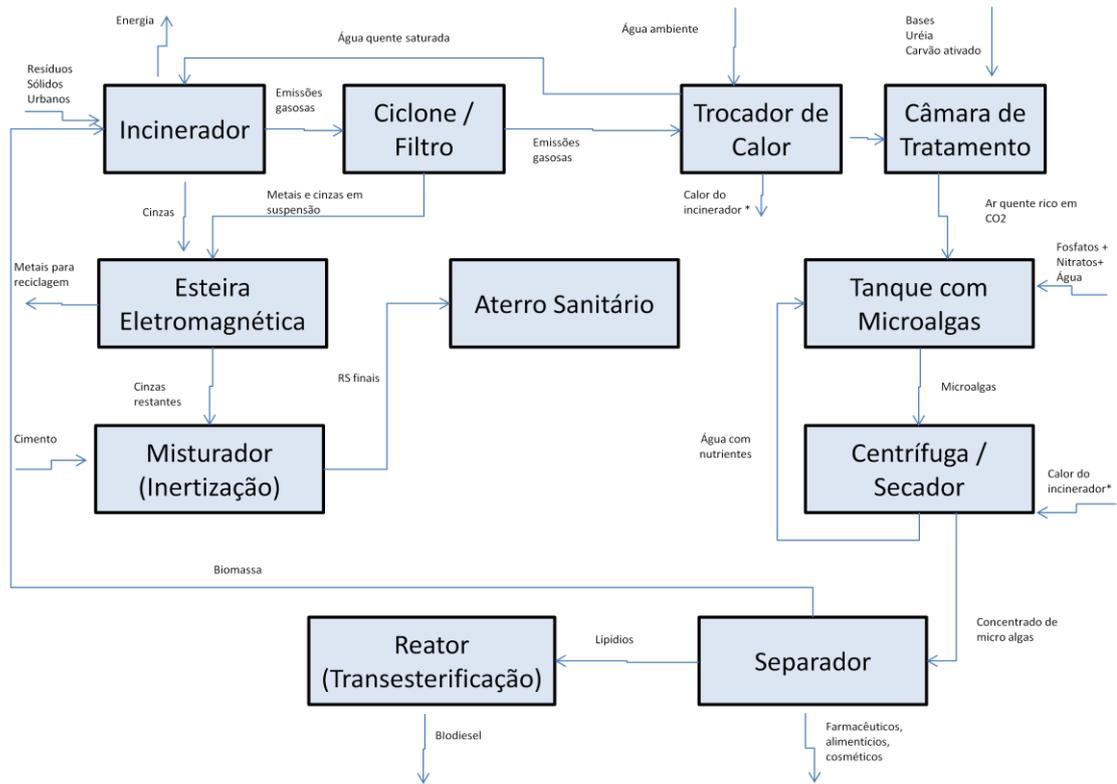


Ilustração 5: Fluxograma completo do processo proposto

A etapa de aquecimento do chorume para alimentação das microalgas será desconsiderada para o modelo calculado, para simplificar a análise realizada e pois sua real viabilidade ainda não foi avaliada.

Assim, o modelo em estudo para o reator usado nos cálculos de balanço e avaliação de ciclo de vida segue abaixo:



**Ilustração 6: Fluxograma simplificado do processo proposto**

As interações do sistema de incineração e de microalgas se dão de três formas. A primeira é a fixação do CO<sub>2</sub> produzido nas microalgas, útil para os dois processos porque reduz o impacto da emissão do gás carbônico para a atmosfera, e reduz completamente os custos de alimentação das microalgas referente a gases. A segunda interação é o uso da vazão de gás na base dos tanques de microalgas para favorecer uma maior homogeneização do sistema, reduzindo a energia gasta com agitação. A última interação envolve o uso da biomassa que resta após o processo de extração do óleo das microalgas para a incineração, reduzindo impactos e custos de tratamento desta biomassa.

Outra possível interação entre os sistemas é uso do calor de saída dos gases de combustão para aquecer e evaporar parte da água das microalgas, facilitando o processo de secagem. Porém o calor específico dos gases de combustão é muito baixo assim como o teor de microalgas no meio de cultivo, e para se afirmar a real efetividade dessa interação seria necessária uma eficiência muito elevada de troca térmica, portanto ela será desconsiderada neste trabalho.

O funcionamento de ambos os sistemas ocorrerá conforme descrito na referência bibliográfica, sendo que as interações entre eles não mudará em grande parte os funcionamentos individuais.

### 3.3. Entrada e saídas do incinerador

Para cálculo dos balanços de entrada, foram utilizados dados levantados para duas unidades de incineração na Itália, uma em Cremona outra em Milão (Arena et al, 2003). Os dados estão listados abaixo, e tem como base a incineração de 1 kg de RSU:

Tabela 3: Inventário do Incinerador

Entradas			Saídas		
<b>RSU</b>	1,00	kg	<b>CO2</b>	0,953	kg
<b>Ar</b>	5,60	kg	<b>H2O</b>	0,301	kg
<b>Água de processo</b>	0,1580	kg	<b>O2</b>	0,560	kg
<b>Cinzas</b>	0,0172	kg	<b>N2</b>	4,765	kg
<b>CaO</b>	0,0250	kg	<b>NOx</b>	1,965	g
<b>Silicato de Sódio</b>	0,0015	kg	<b>SO2</b>	0,197	g
<b>Carvão Ativado</b>	0,0025	kg	<b>HCl</b>	0,098	g
<b>Ca(OH2)</b>	0,0032	kg	<b>Fuligem</b>	0,049	g
<b>Cimento</b>	0,0135	kg	<b>Carbono orgânico</b>	0,002	g
<b>Ureia</b>	0,0030	kg	<b>CO</b>	0,098	g
			<b>Dioxinas e furanos</b>	0,000001	g
			<b>Hg</b>	0,000660	g
			<b>Cd</b>	0,000660	g
			<b>Metais pesados</b>	0,002	g
			<b>Cinzas ciclone</b>	0,090	kg
			<b>Cinzas incinerador</b>	0,170	kg
<b>Gás para queima</b>	0,036	MJ	<b>Energia elétrica</b>	2,420	MJ

Conforme já mencionado, o poder calorífico médio de RSU é o suficiente para a combustão espontânea, sendo assim independente de outras fontes de energia para a queima. Porém a composição pode apresentar grandes variações de material orgânico e de umidade, portanto se faz necessário o uso de gás adicional para queima de forma a auxiliar a manutenção da temperatura da câmara de incineração.

### 3.4. Modelagem matemática das microalgas

Conforme o modelo proposto baseado nas limitações de crescimento em função de incidência de luz e nutrientes (Thornton et al., 2010), e com base na alimentação necessária de nutrientes para as microalgas (Doucha et al., 2005) pode-se chegar ao seguinte inventário para o cultivo de microalgas:

Tabela 4: Inventário do cultivo de microalgas

Entradas		Saídas	
<b>CO2</b>	4,4000 kg	<b>Biomassa microalga</b>	1,0000 kg
<b>Fertilizantes</b>	0,1000 kg	<b>CO2</b>	2,6000 kg
<b>KH2PO4</b>	0,0395 kg	<b>O2</b>	2,6619 kg
<b>MgSO4.7H2O</b>	0,0290 kg	<b>H2O</b>	1,3897 kg
<b>FeSO4.7H2O</b>	0,0050 kg	<b>NOx</b>	0,0078 kg
<b>H3BO3</b>	0,1370 g		
<b>CuSO4.5H2O</b>	0,1580 g		
<b>CoSO4.7H2O</b>	0,1000 g		
<b>MnSO4.4H2O</b>	0,6080 g		
<b>(NH4)6Mo7O24.H2O</b>	0,0290 g		
<b>ZnSO4.7H2O</b>	0,4400 g		
<b>NH4VO3</b>	0,0023 g		
<b>H2O</b>	1,3897 kg		
<b>O2</b>	2,5855 kg		
<b>NOx</b>	0,0091 kg	<b>Energia Consumida</b>	5,917 MJ

O modelo matemático contempla a alimentação de CO<sub>2</sub> realizada por meio do bombeamento dos gases de combustão do incinerador para o tanque de microalgas. Assim a entrada contará com a presença não apenas de dióxido de carbono, mas também de uma pequena taxa de óxidos de nitrogênio que serão em parte dissolvidos no meio e consumidos pelas microalgas, além da umidade contida nos gases de combustão ser utilizada no sentido de repor a perda de água para atmosfera por evaporação. A maior parte da energia gasta no processo de obtenção da biomassa concentrada é relacionada à centrifugação e secagem da mesma, porém a mistura do meio também apresenta representatividade desse consumo, sendo responsável por 26% dos gastos energéticos.

Dessa forma, o modelo minimiza qualquer gasto com a obtenção de CO<sub>2</sub>, manutenção do volume de água do sistema e minimiza em partes os gastos com nutrientes. Assumindo que a alimentação dos gases será realizada na base dos tanques (raceways), no mesmo sentido do escoamento do meio, uma parcela dos gastos energéticos de mistura também será reduzida. Deve ser ressaltado que as microalgas só apresentaram crescimento e fixação do CO<sub>2</sub> nos períodos do dia em que tenha a incidência de luz no meio de cultivo.

### 3.5. Produção de biodiesel

Usando a pasta concentrada de microalgas obtida após a secagem do meio de cultivo de microalgas, é possível extrair o óleo das microalgas, rico em triglicérides com potencial uso para a produção de óleo diesel.

A partir de estudos de produção de biodiesel (Haas et al., 2003) e de estudos da avaliação de ciclo de vida do biodiesel e petrodiesel (Sheehan et al., 1998), pode-se chegar ao seguinte inventário para produção do biodiesel a partir de microalgas.

Tabela 5: Inventário da produção de biodiesel de microalgas

Entradas			Saídas		
<b>Biomassa de microalga</b>	1,000	kg	<b>Óleo de microalga</b>	0,250	kg
<b>Hexano</b>	0,0028	kg	<b>Restante biomassa</b>	0,750	kg
<b>Óleo de microalga</b>	0,250	kg	<b>Biodiesel de microalga</b>	0,251	kg
<b>Metanol</b>	0,025	kg	<b>Glicerina</b>	0,022	kg
<b>Metóxido de sódio</b>	0,003	kg	<b>Água</b>	0,008	kg
<b>Ácido clorídrico</b>	0,002	kg	<b>Resíduos</b>	0,008	kg
<b>Hidroxido de sodio</b>	0,001	kg			
<b>Água</b>	0,008	kg	<b>Energia consumida</b>	0,188	MJ

A taxa de óleo de 25% assumida é conservadora (Alabi et al., 2009), e o hexano é utilizado para remover esse óleo das microalgas. Em sequência é realizada a separação dos dois e o hexano retorna ao sistema.

O processo de produção do biodiesel de microalgas é muito semelhante ao de fontes de óleo vegetal. O metanol é o principal material adicionado ao sistema, e como principal subproduto a glicerina é formada. A biomassa restante da separação do óleo pode ser incinerada, aumentando a entrada de material orgânico no incinerador e eliminando um possível impacto para o meio ambiente.

Estudos relacionados ao cultivo mixotrófico de microalgas colocam a glicerina como uma ótima fonte de carbono para o crescimento de microalgas (Garcia et al., 2005). Portanto existe o potencial de se usar a glicerina como alimentação para as microalgas aumentando sua produtividade em cultivo mixotrófico, ou até mesmo para manter o crescimento em cultivo heterotrófico para os períodos do dia sem incidência solar.

## 4. Avaliação do Ciclo de Vida

### 4.1. Definição do objetivo e escopo

O objetivo da avaliação de ciclo de vida é analisar os diferentes impactos ambientais de diferentes formas de tratamento de resíduos sólidos urbanos. Além disso, entender outros potenciais impactos (ou redução dos mesmos) a partir da recuperação energética dos resíduos e da fixação do CO<sub>2</sub> em microalgas para a produção de biocombustíveis.

### 4.2. Definição dos sistemas de produto

Os sistemas a serem estudados são os seguintes:

- Incineração de resíduos sólidos urbanos com fixação de parte do gás carbônico em microalgas e uso da biomassa para produção de biodiesel
- Deposição de resíduos sólidos urbanos em aterro, com produção da energia e de diesel para complementar o sistema para que iguale o outro sistema

Essa comparação proposta será feita em 3 etapas:

- Comparação entre processos de gestão de resíduos. Análise dos impactos isolando as formas de tratamento
- Comparação entre produções de biodiesel. Análise dos impactos isolando as formas de produção do diesel, dentre eles o biodiesel da microalga, biodiesel de soja e diesel do petróleo
- Comparação dos sistemas completos

### 4.3. Análise do Inventário

Os dados de inventario para a ACV em estudo são aqueles apontados na modelagem do sistema, conforme demonstrados a seguir:

Tabela 6: Inventário do Incinerador

Entradas			Saídas		
RSU	1,00	kg	CO <sub>2</sub>	0,953	kg
Ar	5,60	kg	H <sub>2</sub> O	0,301	kg
Água de processo	0,1580	kg	O <sub>2</sub>	0,560	kg
Cinzas	0,0172	kg	N <sub>2</sub>	4,765	kg
CaO	0,0250	kg	NO <sub>x</sub>	1,965	g
Silicato de Sódio	0,0015	kg	SO <sub>2</sub>	0,197	g
Carvão Ativado	0,0025	kg	HCl	0,098	g
Ca(OH <sub>2</sub> )	0,0032	kg	Fuligem	0,049	g
Cimento	0,0135	kg	Carbono orgânico	0,002	g
Ureia	0,0030	kg	CO	0,098	g
			Dioxinas e furanos	0,000001	g
			Hg	0,000660	g
			Cd	0,000660	g
			Metais pesados	0,002	g
			Cinzas ciclone	0,090	kg
			Cinzas incinerador	0,170	kg
Gás para queima	0,036	MJ	Energia elétrica	2,420	MJ

Tabela 7: Inventário do cultivo de microalgas

Entradas			Saídas		
CO <sub>2</sub>	4,4000	kg	Biomassa microalga	1,0000	kg
Fertilizantes	0,1000	kg	CO <sub>2</sub>	2,6000	kg
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0,0395	kg	O <sub>2</sub>	2,6619	kg
MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0,0290	kg	H <sub>2</sub> O	1,3897	kg
FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0,0050	kg	NO <sub>x</sub>	0,0078	kg
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,1370	g			
CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	0,1580	g			
CoSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0,1000	g			
MnSO <sub>4</sub> .4H <sub>2</sub> O	0,6080	g			
(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> .H <sub>2</sub> O	0,0290	g			
ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0,4400	g			
NH <sub>4</sub> VO <sub>3</sub>	0,0023	g			
H <sub>2</sub> O	1,3897	kg			
O <sub>2</sub>	2,5855	kg			
NO <sub>x</sub>	0,0091	kg	Energia Consumida	5,917	MJ

Tabela 8: Inventário da produção de biodiesel de microalgas

Entradas			Saídas		
<b>Biomassa de microalga</b>	1,000	kg	<b>Óleo de microalga</b>	0,250	kg
<b>Hexano</b>	0,0028	kg	<b>Restante biomassa</b>	0,750	kg
<b>Óleo de microalga</b>	0,250	kg	<b>Biodiesel de microalga</b>	0,251	kg
<b>Metanol</b>	0,025	kg	<b>Glicerina</b>	0,022	kg
<b>Metóxido de sódio</b>	0,003	kg	<b>Água</b>	0,008	kg
<b>Ácido clorídrico</b>	0,002	kg	<b>Resíduos</b>	0,008	kg
<b>Hidroxido de sodio</b>	0,001	kg			
<b>Água</b>	0,008	kg	<b>Energia consumida</b>	0,188	MJ

Para realizar a análise dados mais aproximados de uma real estação de tratamento de resíduos sólidos urbanos, foi tomada como base uma população de 100.000 habitantes, com produção de 0,7kg RSU/dia.hab. Dessa forma, a base para cálculo dos sistemas de tratamento será de 70.000 kg/dia.

Para cálculo da biomassa de microalga produzida, será considerado que a quantidade de CO<sub>2</sub> fixado será de 40% em relação ao período luminoso do dia, assumido 40% do dia. Assim, a taxa média de fixação de CO<sub>2</sub> diária é de cerca de 16%.

Para os inventários de aterro sanitário, da produção de energia elétrica, produção e cultivo da soja e produção de óleo diesel, serão consideradas bases que já constam no software SimaPro®.

#### 4.4. Resultados e Discussão

Conforme mencionado nos métodos de avaliação de ciclo de vida, existem dois métodos principais de análise, o Midpoint e o Endpoint. Enquanto Midpoint favorece uma análise mais precisa das diferentes categorias de impacto ambiental, Endpoint é capaz de oferecer uma análise de sistemas completos por meio de uma pontuação única.

Além de diferentes métodos, existem diferentes perspectivas de análise. Dentre estas perspectivas está a Hierárquica, o modelo mais consensual, frequentemente encontrado em modelos científicos, considerado o padrão (Pré-Consultants). Além deste, existem também a perspectiva Individualista, com uma visão a maior curto prazo e otimista, e a perspectiva Iguatária, com uma visão a longo prazo e mais cautelosa.

Para este projeto será usado o método Midpoint sob perspectiva Hierárquica para todas as análises, para poder analisar melhor os diferentes impactos ambientais de cada escolha feita. Para a análise de sistemas completos, será realizada também a avaliação com o método Endpoint sob perspectiva Hierárquica.

#### 4.4.1. Comparação entre métodos de tratamento

A primeira análise realizada é a comparação da ACV de dois métodos de tratamento de RSU, o aterro sanitário e o incinerador. Neste primeiro momento foi desconsiderado o efeito da recuperação energética para as ACVs.

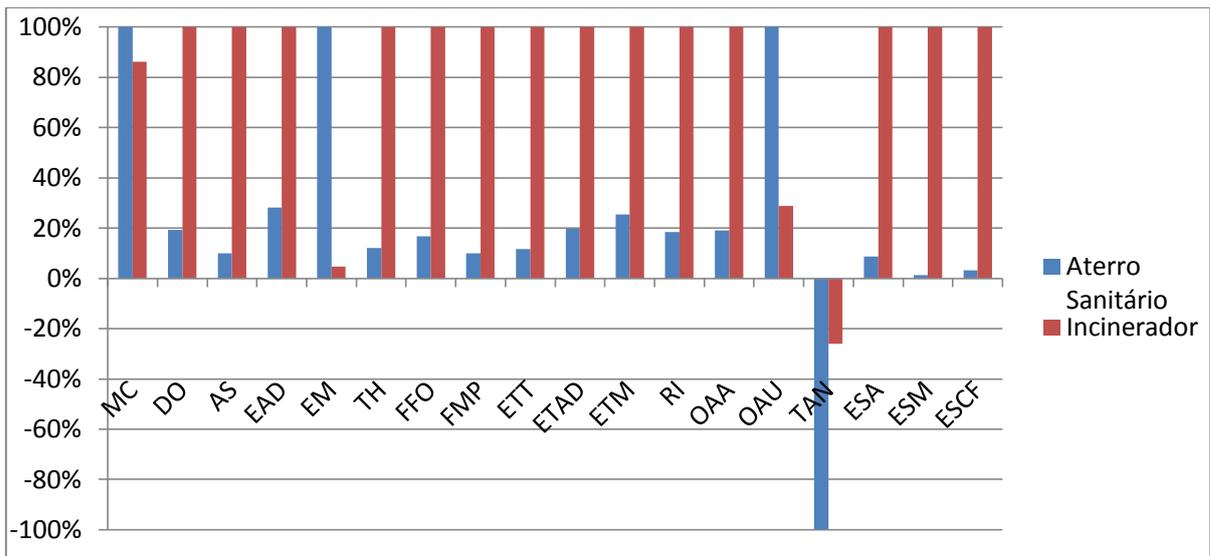


Gráfico 1: Comparação de impactos entre aterro sanitário e incinerador

Tabela 9: Comparação de impactos entre aterro sanitário e incinerador

Categoria de Impacto	Unidades	Caracterização	
		Aterro Sanitário	Incinerador
Mudança Climática	kg CO2 eq	35552,51	30648,91
Depleção do Ozônio	kg CFC-11 eq	6,45E-05	3,33E-04
Acidificação de Solo	kg SO2 eq	9,84	97,72
Eutrofização de Água Doce	kg P eq	0,81	2,85
Eutrofização Marinha	kg N eq	197,08	9,07
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	247,04	2027,61
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	kg NMVOC	28,60	171,17
Formação de Material Particulado	kg PM10 eq	3,81	38,27
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DB eq	0,10	0,84
Ecotoxicidade de Água Doce	kg 1,4-DB eq	6,56	33,39
Ecotoxicidade Marinha	kg 1,4-DB eq	3,13	12,32
Radiação Ionizante	kg U235 eq	76,30	413,44
Ocupação de Áreas Agrícolas	m2a	17,65	92,36
Ocupação de Áreas Urbanas	m2a	122,67	35,37
Transformação de Áreas Naturais	m2	-3,50	-0,91
Esgotamento de Água	m3	851,13	9764,60
Esgotamento de Metais	kg Fe eq	0,02	1,75
Esgotamento de Combustíveis Fósseis	kg oil eq	0,04	1,22

Como pontos principais de análise pode se levantar que o incinerador apresenta maiores valores em quase todas as categorias de impacto. Isso se deve ao grande volume de emissões que, mesmo controladas para limites permitidos pela legislação, ainda terão impacto relativamente alto no meio ambiente. Além disso, o incinerador demanda muitos produtos químicos para controlar tais emissões, e esse uso aumenta a carga do inventário do incinerador.

Porém, vale ressaltar o maior impacto da opção de aterro na categoria de mudança climática. Isso se deve a alta evasão de metano (mesmo em casos em que há sua captação, como nesse estudo), sendo este um dos causadores do efeito estufa, com impacto mais do que 20 vezes maior que o do CO<sub>2</sub>.

Por último deve-se também considerar que estes impactos do aterro são apenas para casos em que há a devida preparação do terreno. Lixões e aterros controlados apresentam impactos muito maiores para o meio ambiente, pois o metano não é nem parcialmente captado e boa parte do chorume irá contaminar o solo e possivelmente lençóis aquíferos.

Prosseguindo com as análises, a segunda é a comparação da ACV dos mesmos dois métodos, porém no inventário do aterro sanitário é adicionada

também a energia que o incinerador produz a mais que um aterro com captação de biogás. Essa análise assume que a energia não recuperada dos resíduos deverá ser produzida de outras formas, aumentando a carga ambiental da opção aterro.

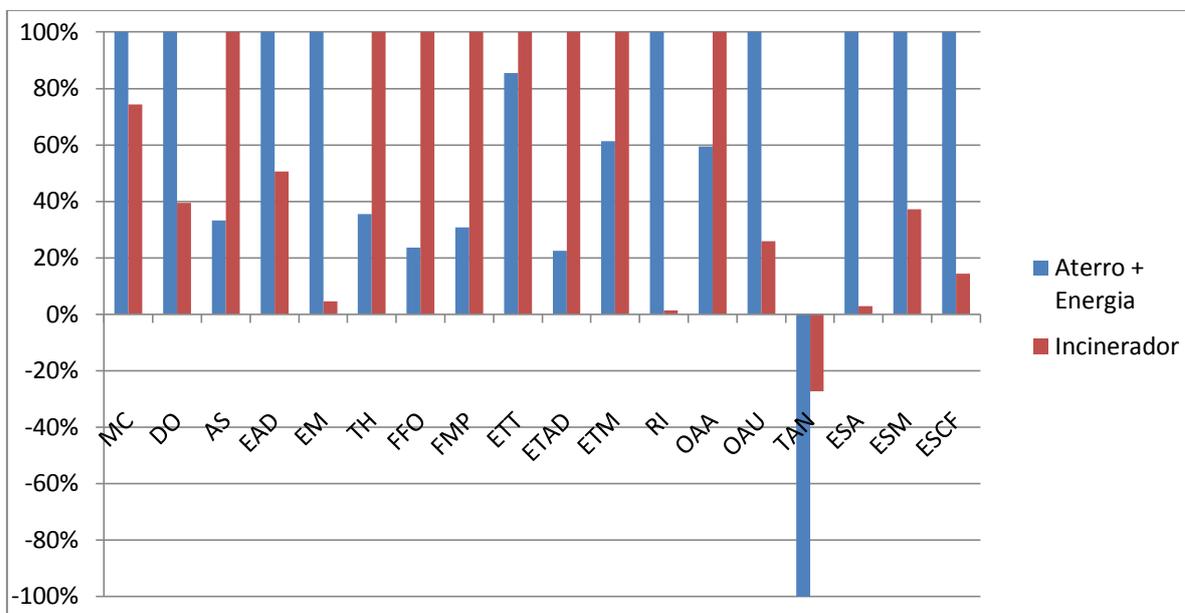


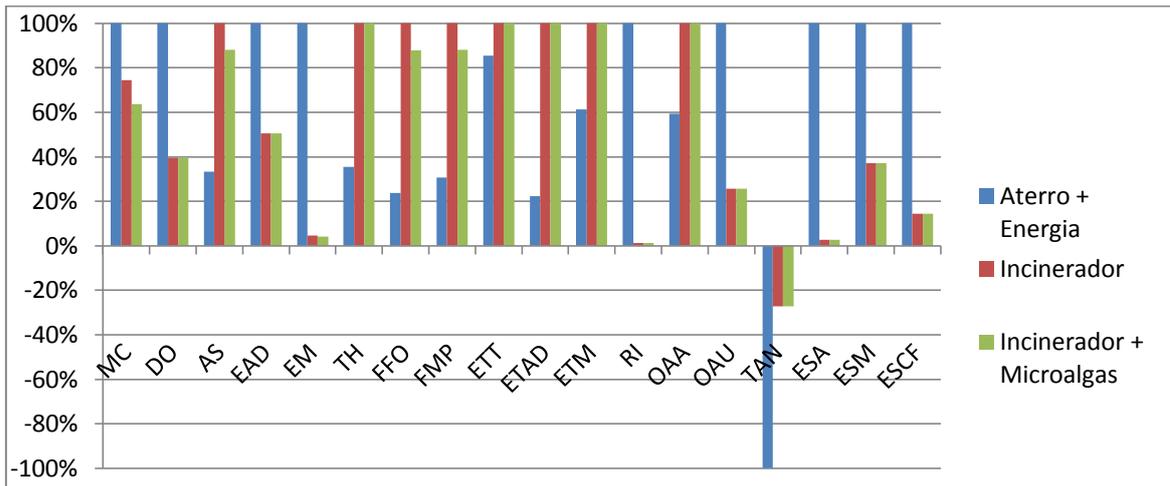
Gráfico 2: Comparação de impactos entre aterro sanitário com energia complementar e incinerador

Tabela 10: Comparação de impactos entre aterro sanitário com energia complementar e incinerador

Categoria de Impacto	Unidades	Caracterização	
		Aterro + Energia	Incinerador
Mudança Climática	kg CO2 eq	41195,41	30648,91
Depleção do Ozônio	kg CFC-11 eq	8,44E-04	3,33E-04
Acidificação de Solo	kg SO2 eq	32,54	97,72
Eutrofização de Água Doce	kg P eq	5,64	2,85
Eutrofização Marinha	kg N eq	198,60	9,07
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	718,01	2027,61
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	kg NMVOC	40,49	171,17
Formação de Material Particulado	kg PM10 eq	11,75	38,27
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DB eq	0,72	0,84
Ecotoxicidade de Água Doce	kg 1,4-DB eq	7,49	33,39
Ecotoxicidade Marinha	kg 1,4-DB eq	7,55	12,32
Radiação Ionizante	kg U235 eq	31396,67	413,44
Ocupação de Áreas Agrícolas	m2a	54,98	92,36
Ocupação de Áreas Urbanas	m2a	137,12	35,37
Transformação de Áreas Naturais	m2	-3,34	-0,91
Esgotamento de Água	m3	348865,78	9764,60
Esgotamento de Metais	kg Fe eq	4,71	1,75
Esgotamento de Combustíveis Fósseis	kg oil eq	8,51	1,22

A partir da comparação, é possível perceber que a grande parte da energia recuperada dos resíduos traz grandes benefícios para o sistema do incinerador. Em categorias que o incinerador apresentava menor impacto a diferença foi aumentada, e em algumas categorias houve a inversão de maior impacto entre as formas de tratamento, como exemplo na depleção do ozônio.

Para terminar a análise de formas de tratamento, é realizada a análise dos dois últimos sistemas adicionado um terceiro, o incinerador com fixação do CO2 por microalgas. Nesse sistema é considerado apenas que parte das emissões gasosas já tratadas será reduzida em função do consumo da mesma pelas microalgas.



**Gráfico 3: Comparação de impactos entre aterro com energia, incinerador e incinerador com fixação de CO2**

**Tabela 11: Comparação de impactos entre aterro com energia, incinerador e incinerador com fixação de CO2**

Categoria de Impacto	Unidades	Caracterização		
		Aterro + Energia	Incinerador	Incinerador + Microalgas
Mudança Climática	kg CO2 eq	41195,41	30648,91	26295,69
Depleção do Ozônio	kg CFC-11 eq	0,00	0,00	0,00
Acidificação de Solo	kg SO2 eq	32,54	97,72	86,16
Eutrofização de Água Doce	kg P eq	5,64	2,85	2,85
Eutrofização Marinha	kg N eq	198,60	9,07	8,26
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	718,01	2027,61	2027,61
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	kg NMVOC	40,49	171,17	150,53
Formação de Material Particulado	kg PM10 eq	11,75	38,27	33,73
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DB eq	0,72	0,84	0,84
Ecotoxicidade de Água Doce	kg 1,4-DB eq	7,49	33,39	33,39
Ecotoxicidade Marinha	kg 1,4-DB eq	7,55	12,32	12,32
Radiação Ionizante	kg U235 eq	31396,67	413,44	413,44
Ocupação de Áreas Agrícolas	m2a	54,98	92,36	92,36
Ocupação de Áreas Urbanas	m2a	137,12	35,37	35,37
Transformação de Áreas Naturais	m2	-3,34	-0,91	-0,91
Esgotamento de Água	m3	348865,78	9764,60	9764,60
Esgotamento de Metais	kg Fe eq	4,71	1,75	1,75
Esgotamento de Combustíveis Fósseis	kg oil eq	8,51	1,22	1,22

Este terceiro modelo apresenta alguns ganhos em relação ao simples incinerador. Sequestrando 16% do CO2 produzido e também outras emissões gasosas, são expressivas as reduções de impacto na mudança climática, de acidificação do solo (também em função da retirada de óxidos de nitrogênio) e formação de oxidantes fotoquímicos.

#### 4.4.2. Comparação entre obtenção de diesel

Analisando separadamente as formas de produzir o óleo diesel, três formas de produção de 1 kg são comparadas na análise a seguir. O biodiesel da microalga é estudado de forma isolada. Para a alimentação da microalga é considerada a alimentação com CO2 líquido, gasto energético igual ao total do modelo proposto e também com produção de resíduos sólidos igual ao restante da biomassa que não será utilizada para a produção de biodiesel.

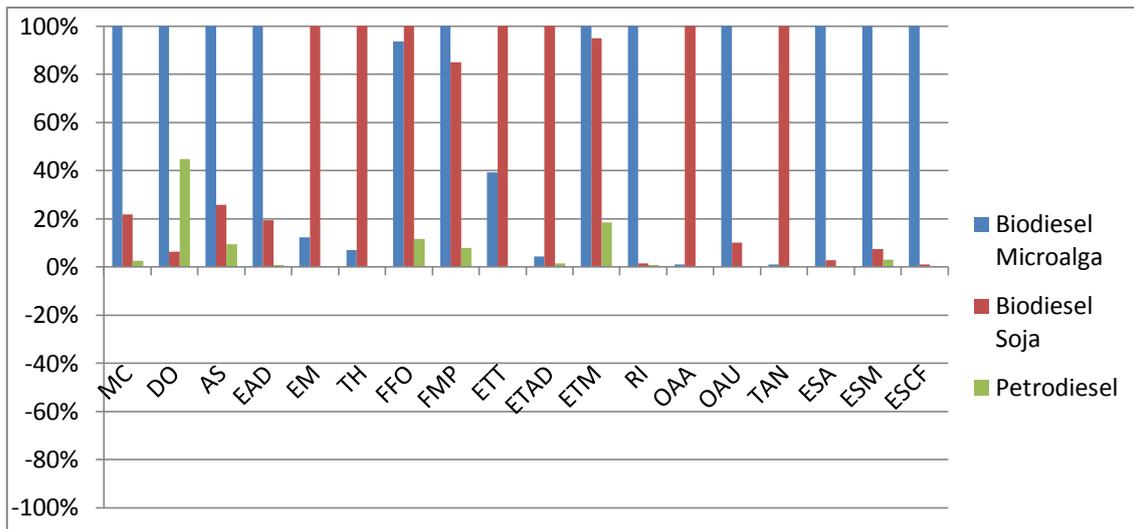


Gráfico 4: Comparação de impactos entre biodiesel de microalgas, biodiesel de soja e petrodiesel

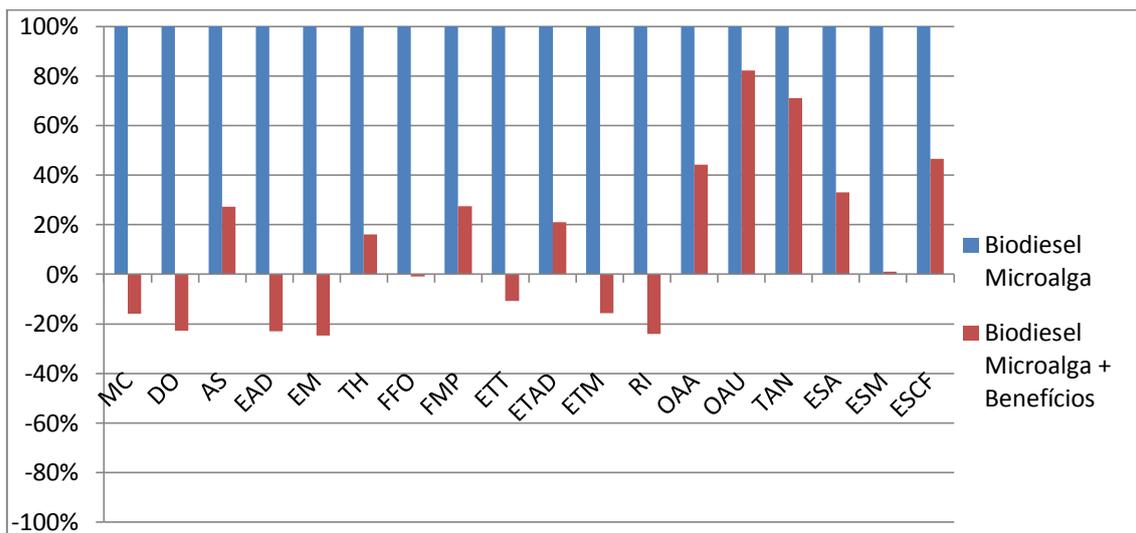
Tabela 12: Comparação de impactos entre biodiesel de microalgas, biodiesel de soja e petrodiesel

Categoria de Impacto	Unidades	Caracterização		
		Biodiesel Microalga	Biodiesel Soja	Petrodiesel
Mudança Climática	kg CO2 eq	16,5481	3,6021	0,4090
Depleção do Ozônio	kg CFC-11 eq	1,02E-06	6,48E-08	4,54E-07
Acidificação de Solo	kg SO2 eq	0,0505	0,0131	0,0047
Eutrofização de Água Doce	kg P eq	4,39E-03	8,50E-04	3,80E-05
Eutrofização Marinha	kg N eq	2,51E-03	2,05E-02	7,36E-05
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	0,4795	6,7602	0,0316
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	kg NMVOC	0,0231	0,0246	0,0029
Formação de Material Particulado	kg PM10 eq	0,0155	0,0131	0,0012
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DB eq	5,11E-03	1,30E-02	3,77E-05
Ecotoxicidade de Água Doce	kg 1,4-DB eq	0,0037	0,0839	0,0013
Ecotoxicidade Marinha	kg 1,4-DB eq	0,0057	0,0055	0,0011
Radiação Ionizante	kg U235 eq	3,5342	0,0505	0,0304
Ocupação de Áreas Agrícolas	m2a	0,0497	4,6489	0,0002
Ocupação de Áreas Urbanas	m2a	0,0727	0,0073	0,0001
Transformação de Áreas Naturais	m2	0,0015	0,1390	0,0000
Esgotamento de Água	m3	79,320	2,240	0,288
Esgotamento de Metais	kg Fe eq	1,85E-03	1,36E-04	5,47E-05
Esgotamento de Fósseis	kg oil eq	1,72E-02	1,93E-04	6,34E-05

O biodiesel a partir da microalga apresenta impactos ambientais muito maiores do que as outras formas de produção estudadas. Isso se deve aos fatores anteriormente mencionados, sendo principal responsável a alimentação

de CO<sub>2</sub>. A produção de CO<sub>2</sub> comprimido representa uma grande carga ambiental, e dado que boa parte do CO<sub>2</sub> será perdida para a atmosfera, existe também a carga ambiental dessa emissão. O propósito desta análise é mostrar que a produção de biodiesel de microalga é praticamente inviável sem que seja feita de forma conjunta a tratamento de resíduos, efluentes ou emissões gasosas.

Portanto, é analisada a vantagem do biodiesel de microalga com benefícios da incineração, tais como alimentação de CO<sub>2</sub> e eliminação de biomassa sem cargas ambientais, e também redução da energia gasta com agitação e mistura do sistema:

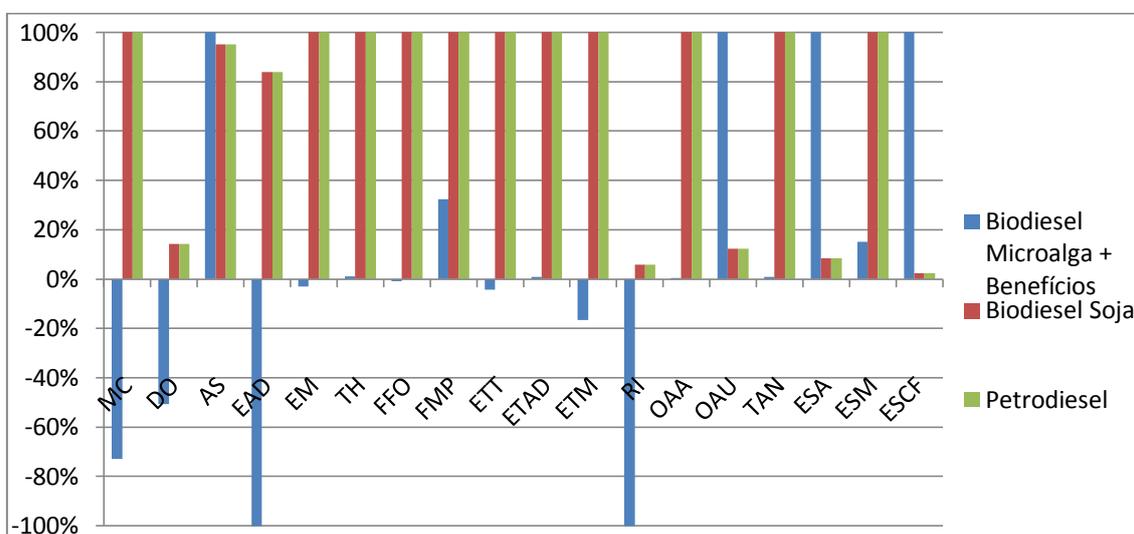


**Gráfico 5: Comparação de impactos entre biodiesel de microalgas e biodiesel de microalgas com benefícios da incineração**

**Tabela 13: Comparação de impactos entre biodiesel de microalgas e biodiesel de microalgas com benefícios da incineração**

Categoria de Impacto	Unidades	Caracterização	
		Biodiesel Microalga	Biodiesel Microalga + Benefícios
Mudança Climática	kg CO2 eq	16,55	-2,62
Depleção do Ozônio	kg CFC-11 eq	1,02E-06	-2,30E-07
Acidificação de Solo	kg SO2 eq	0,0505	0,0137
Eutrofização de Água Doce	kg P eq	0,0044	-0,0010
Eutrofização Marinha	kg N eq	0,0025	-0,0006
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	0,4795	0,0768
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	kg NMVOC	0,0231	-0,0002
Formação de Material Particulado	kg PM10 eq	0,0155	0,0042
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DB eq	0,0051	-0,0005
Ecotoxicidade de Água Doce	kg 1,4-DB eq	0,0037	0,0008
Ecotoxicidade Marinha	kg 1,4-DB eq	0,0057	-0,0009
Radiação Ionizante	kg U235 eq	3,5342	-0,8539
Ocupação de Áreas Agrícolas	m2a	0,0497	0,0220
Ocupação de Áreas Urbanas	m2a	0,0727	0,0598
Transformação de Áreas Naturais	m2	0,0015	0,0011
Esgotamento de Água	m3	79,32	26,27
Esgotamento de Metais	kg Fe eq	1,85E-03	2,05E-05
Esgotamento de Combustíveis Fósseis	kg oil eq	0,0172	0,0080

Conforme o esperado, as cargas ambientais foram reduzidas expressivamente em todas as categorias. Dessa forma o biodiesel microalgal se torna muito mais interessante ambientalmente, e cabe a nova análise com as outras formas de produção:



**Gráfico 6: Comparação de impactos entre biodiesel de microalgas e biodiesel de microalgas com benefícios, biodiesel da soja e petrodiesel**

**Tabela 14: Comparação de impactos entre biodiesel de microalgas e biodiesel de microalgas com benefícios, biodiesel da soja e petrodiesel**

Categoria de Impacto	Unidades	Caracterização		
		Biodiesel Microalga + Benefícios	Biodiesel Soja	Petrodiesel
Mudança Climática	kg CO2 eq	-2,6243	3,6021	0,4090
Depleção do Ozônio	kg CFC-11 eq	-2,30E-07	6,48E-08	4,54E-07
Acidificação de Solo	kg SO2 eq	0,0137	0,0131	0,0047
Eutrofização de Água Doce	kg P eq	-1,01E-03	8,50E-04	3,80E-05
Eutrofização Marinha	kg N eq	-6,21E-04	2,05E-02	7,36E-05
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	0,0768	6,7602	0,0316
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	kg NMVOC	-0,0002	0,0246	0,0029
Formação de Material Particulado	kg PM10 eq	0,0042	0,0131	0,0012
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DB eq	-5,49E-04	1,30E-02	3,77E-05
Ecotoxicidade de Água Doce	kg 1,4-DB eq	0,0008	0,0839	0,0013
Ecotoxicidade Marinha	kg 1,4-DB eq	-0,0009	0,0055	0,0011
Radiação Ionizante	kg U235 eq	-0,8539	0,0505	0,0304
Ocupação de Áreas Agrícolas	m2a	0,0220	4,6489	0,0002
Ocupação de Áreas Urbanas	m2a	5,98E-02	7,30E-03	1,20E-04
Transformação de Áreas Naturais	m2	1,06E-03	1,39E-01	5,21E-07
Esgotamento de Água	m3	26,2712	2,2397	0,2882
Esgotamento de Metais	kg Fe eq	2,05E-05	1,36E-04	5,47E-05
Esgotamento de Combustíveis Fósseis	kg oil eq	8,01E-03	1,93E-04	6,34E-05

Mais uma vez conforme o esperado, o biodiesel formado com os benefícios da incineração apresenta uma competitividade muito maior com outras formas de obtenção do óleo. É a melhor opção para a maior parte das categorias em estudo, e expressivamente melhor em categorias como mudança climática, depleção de ozônio e radiação ionizante.

#### 4.4.3. Análise de Sinergia

Realizadas as análises comparativas realizadas entre o incinerador com e sem os benefícios da microalga, e também entre as obtenções de óleo de microalgas com e sem benefício. É possível constatar uma grande sinergia entre os processos, dado que as interações entre eles eliminam cargas ambientais de ambos os lados.

Portanto, foi realizada a análise de ACV comparando o sistema de incinerador e microalgas contando com essas interações entre processos, e o sistema sem sinergia, em que ambos os processos estão considerados sem as devidas interações:

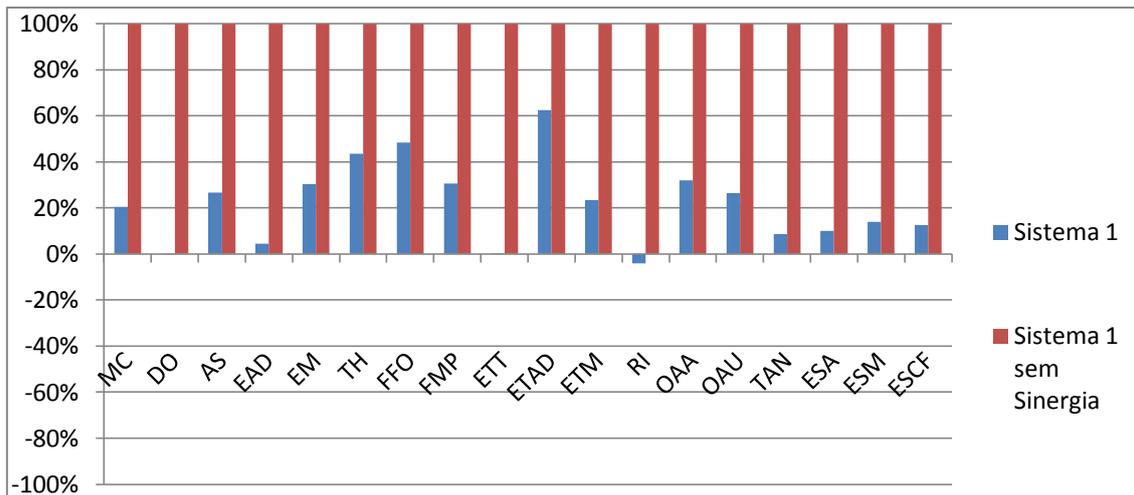


Gráfico 7 : Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 1 sem sinergia

Tabela 15 : Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 1 sem sinergia

Categoria de Impacto	Unidades	Caracterização	
		Sistema 1	Sistema 1 sem Sinergia
Mudança Climática	kg CO2 eq	26699,34	130268,46
Depleção do Ozônio	kg CFC-11 eq	-1,33E-05	6,45E-03
Acidificação de Solo	kg SO2 eq	106,823	401,499
Eutrofização de Água Doce	kg P eq	1,3276	29,2805
Eutrofização Marinha	kg N eq	7,3276	24,1787
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	2143,215	4913,902
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	kg NMVOC	150,2040	309,9860
Formação de Material Particulado	kg PM10 eq	40,1115	131,2906
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DB eq	0,0147	31,5775
Ecotoxicidade de Água Doce	kg 1,4-DB eq	34,5494	55,4042
Ecotoxicidade Marinha	kg 1,4-DB eq	10,9569	46,9000
Radiação Ionizante	kg U235 eq	-871,628	21689,454
Ocupação de Áreas Agrícolas	m2a	125,4532	391,4341
Ocupação de Áreas Urbanas	m2a	125,3304	472,7692
Transformação de Áreas Naturais	m2	0,6894	8,0870
Esgotamento de Água	m3	49302,70	487270,00
Esgotamento de Metais	kg Fe eq	1,7819	12,8925
Esgotamento de Combustíveis Fósseis	kg oil eq	13,2790	104,9008

Conforme esperado, todos os impactos foram significativamente menores para todos os impactos possíveis, sendo menor que a metade ou até inferior a 10% da carga ambiental anterior. Assim, pode-se afirmar que há uma real sinergia entre os processos apresentados, ou seja, a junção dos dois melhora individualmente as duas performances.

#### 4.4.4. Comparação entre sistemas (Midpoint)

Com os sistemas desenhados por completo, é possível analisar os impactos de forma integral. O sistema 1 contempla a incineração de resíduos sólidos urbanos, recuperação energética dos mesmos, fixação do CO<sub>2</sub> pelas microalgas e produção de biodiesel a partir da biomassa formada. Já o sistema 2 contempla a disposição em aterro sanitário, produção de energia por meio da queima do biogás, geração de energia extra para compensar a produzida a mais pelo incinerador e produção de óleo diesel por outros meios que não o de microalgas.

A primeira análise realizada é a de comparação da ACV do sistema 1 com o sistema 2 sendo a produção de diesel a partir da soja:

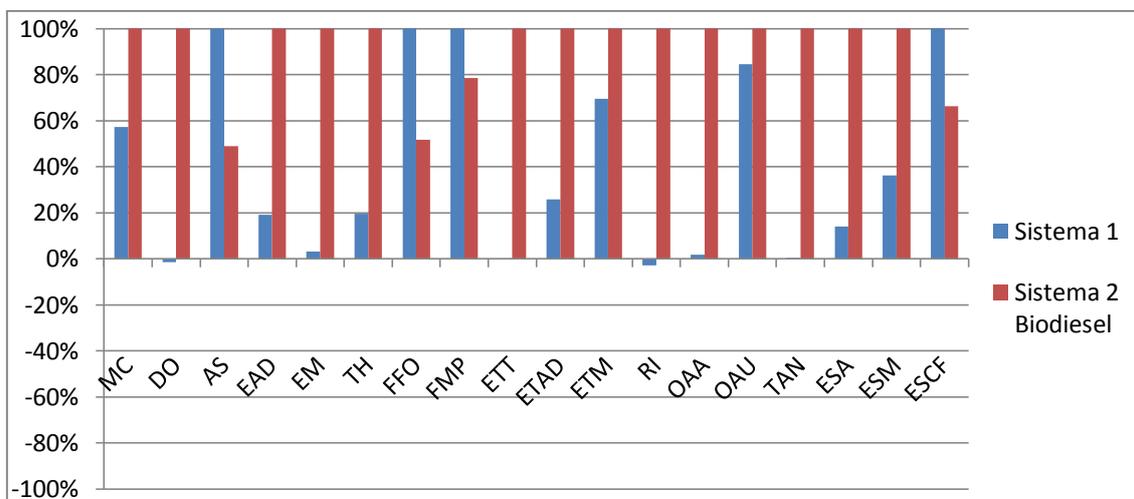


Gráfico 8: Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 2 com biodiesel de soja

Tabela 16 : Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 2 com biodiesel de soja

Categoria de Impacto	Unidades	Caracterização	
		Sistema 1	Sistema 2 Biodiesel
Mudança Climática	kg CO2 eq	26699,34	46616,60
Depleção do Ozônio	kg CFC-11 eq	-1,33E-05	9,42E-04
Acidificação de Solo	kg SO2 eq	106,823	52,185
Eutrofização de Água Doce	kg P eq	1,328	6,917
Eutrofização Marinha	kg N eq	7,328	229,422
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	2143,215	10892,051
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	kg NMVOC	150,204	77,513
Formação de Material Particulado	kg PM10 eq	40,112	31,516
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DB eq	0,015	20,290
Ecotoxicidade de Água Doce	kg 1,4-DB eq	34,549	133,818
Ecotoxicidade Marinha	kg 1,4-DB eq	10,957	15,751
Radiação Ionizante	kg U235 eq	-871,628	31472,613
Ocupação de Áreas Agrícolas	m2a	125,453	7051,589
Ocupação de Áreas Urbanas	m2a	125,330	148,112
Transformação de Áreas Naturais	m2	0,689	205,853
Esgotamento de Água	m3	49302,70	352236,54
Esgotamento de Metais	kg Fe eq	1,782	4,917
Esgotamento de Comustíveis Fósseis	kg oil eq	13,279	8,801

O sistema 1 apresenta resultado melhor em 14 das 18 categorias, e desempenhos expressivamente melhores em categorias chave, como mudança climática, depleção do ozônio e toxicidade humana.

A análise também foi realizada com a produção do diesel a partir do petróleo:

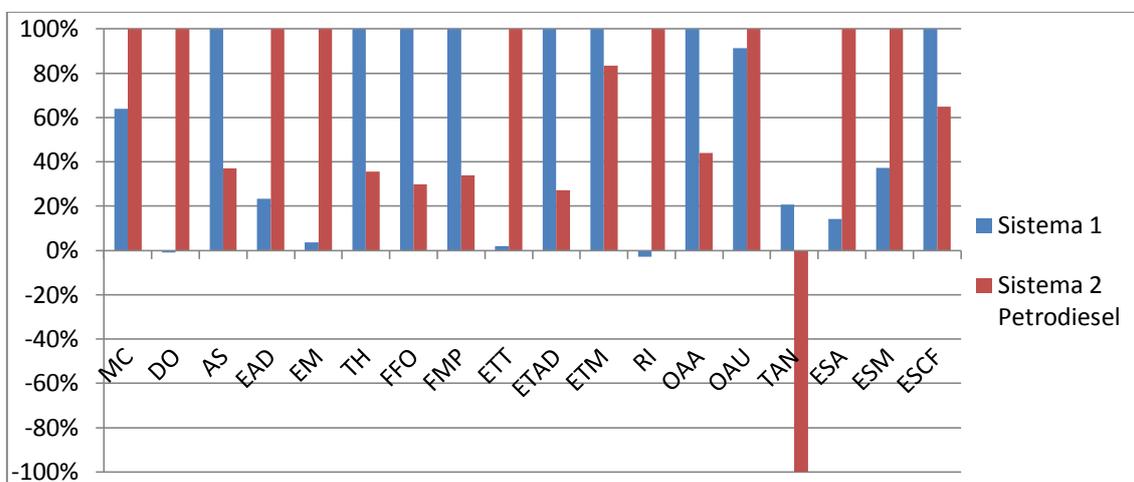


Gráfico 9 : Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 2 com petrodiesel

Tabela 17: Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 2 com petrodiesel

Categoria de Impacto	Unidades	Caracterização		2
		Sistema 1	Sistema Petrodiesel	
Mudança Climática	kg CO2 eq	26699,34	41811,00	
Depleção do Ozônio	kg CFC-11 eq	-1,33E-05	1,53E-03	
Acidificação de Solo	kg SO2 eq	106,823	39,665	
Eutrofização de Água Doce	kg P eq	1,328	5,694	
Eutrofização Marinha	kg N eq	7,328	198,715	
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	2143,21	765,56	
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	kg NMVOC	150,204	44,835	
Formação de Material Particulado	kg PM10 eq	40,112	13,580	
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DB eq	0,015	0,775	
Ecotoxicidade de Água Doce	kg 1,4-DB eq	34,549	9,432	
Ecotoxicidade Marinha	kg 1,4-DB eq	10,957	9,145	
Radiação Ionizante	kg U235 eq	-871,628	31442,405	
Ocupação de Áreas Agrícolas	m2a	125,453	55,209	
Ocupação de Áreas Urbanas	m2a	125,330	137,304	
Transformação de Áreas Naturais	m2	0,689	-3,338	
Esgotamento de Água	m3	49302,70	349299,49	
Esgotamento de Metais	kg Fe eq	1,782	4,794	
Esgotamento de Combustíveis Fósseis	kg oil eq	13,279	8,606	

O sistema 1 apresenta resultado melhor que o sistema 2 em 9 das 18 categorias. Ambos os sistemas se alternam com o menor impacto em categorias chave como mudança climática e toxicidade humana.

Em geral o sistema 1 se apresentou como uma melhor solução do que o sistema 2 (23 menores impactos em relação a 13 maiores impactos), embora as incertezas dos processos em estudo não permitam afirmar uma real evidência das vantagens do sistema proposto. Portanto dois caminhos de análise devem ser analisados, se as vantagens podem ser fruto apenas das vantagens da incineração sobre o aterro sanitário, e a análise pelo método Endpoint, capaz de comparar todos os fatores conjuntamente e pontuar os sistemas por completo e não apenas por categorias.

Assim, a análise comparativa entre os possíveis sistemas 1 com diferentes formas de obtenção do biodiesel fica da seguinte forma:

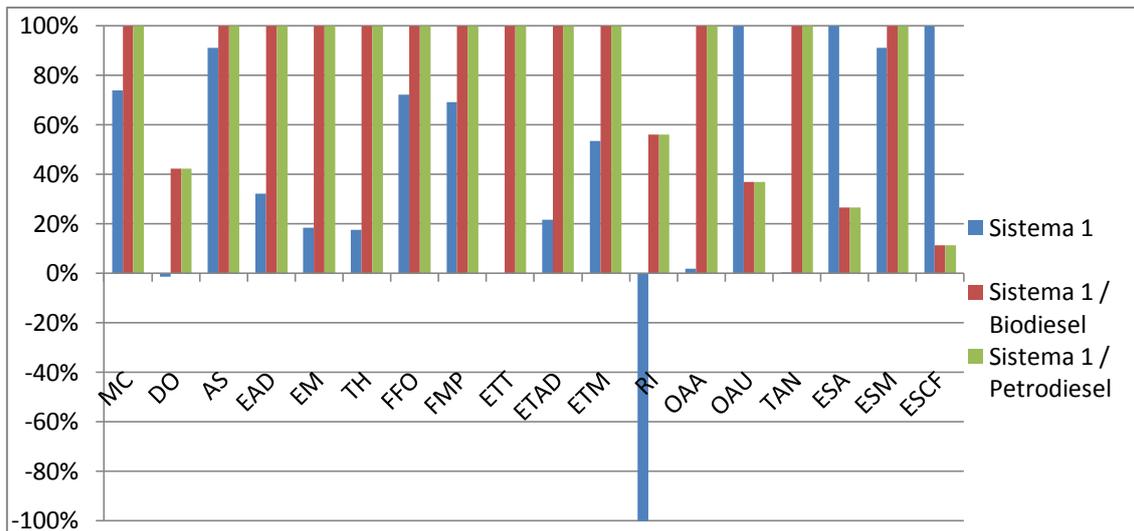


Gráfico 10: Comparação de impactos entre sistema 1, sistema 1 com biodiesel e sistema 1 com petrodiesel

Tabela 18: Comparação de impactos entre sistema 1, sistema 1 com biodiesel e sistema 1 com petrodiesel

Categoria de Impacto	Unidades	Caracterização		
		Sistema 1	Sistema 1 / Biodiesel	Sistema 1 / Petrodiesel
Mudança Climática	kg CO2 eq	26699,34	36070,09	31264,5
Depleção do Ozônio	kg CFC-11 eq	-1,33E-05	4,31E-04	1,02E-03
Acidificação de Solo	kg SO2 eq	106,82	117,36	104,84496
Eutrofização de Água Doce	kg P eq	1,3276	4,1316	2,9089
Eutrofização Marinha	kg N eq	7,3276	39,8846	9,1780
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	2143,21	12201,65	2075,16
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	kg NMVOC	150,2040	208,1915	175,5143
Formação de Material Particulado	kg PM10 eq	40,1115	58,0359	40,0995
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DB eq	0,0147	20,4123	0,8973
Ecotoxicidade de Água Doce	kg 1,4-DB eq	34,5494	159,7106	35,3243
Ecotoxicidade Marinha	kg 1,4-DB eq	10,9569	20,5248	13,9186
Radiação Ionizante	kg U235 eq	-871,6279	489,3816	459,1736
Ocupação de Áreas Agrícolas	m2a	125,4532	7088,9693	92,5894
Ocupação de Áreas Urbanas	m2a	125,3304	46,3611	35,5533
Transformação de Áreas Naturais	m2	0,6894	208,2812	-0,9098
Esgotamento de Água	m3	49302,7031	13135,3585	10198,3173
Esgotamento de Metais	kg Fe eq	1,7819	1,9559	1,8333
Esgotamento de Combustíveis Fósseis	kg oil eq	13,2790	1,5090	1,3139

Com os resultados obtidos pode-se aferir a real vantagem do uso do sistema 1 com a fixação de microalgas. Isso se mostra com a maior parte dos impactos ambientais sendo menores para o sistema com microalgas, 10 entre 18, sendo categorias importantes tais como mudança climática, depleção do ozônio, radiação ionizante e todas as ecotoxicidades. Comprova-se que as vantagens do sistema 1 vem da sinergia entre processos, e não apenas das vantagens da incineração em relação ao aterro sanitário.

#### 4.4.5. Comparação entre Sistemas (Endpoint)

Com o uso do método Endpoint, é possível analisar sistema como um todo, com notas aplicadas para as diferentes categorias, de forma a normalizar e somar todos os impactos causados por cada uma.

Com a finalidade de medir os impactos conjuntos em único indicador, é feita a análise comparativa entre o sistema 1 já apresentado e o sistema 2 com biodiesel a partir da soja:

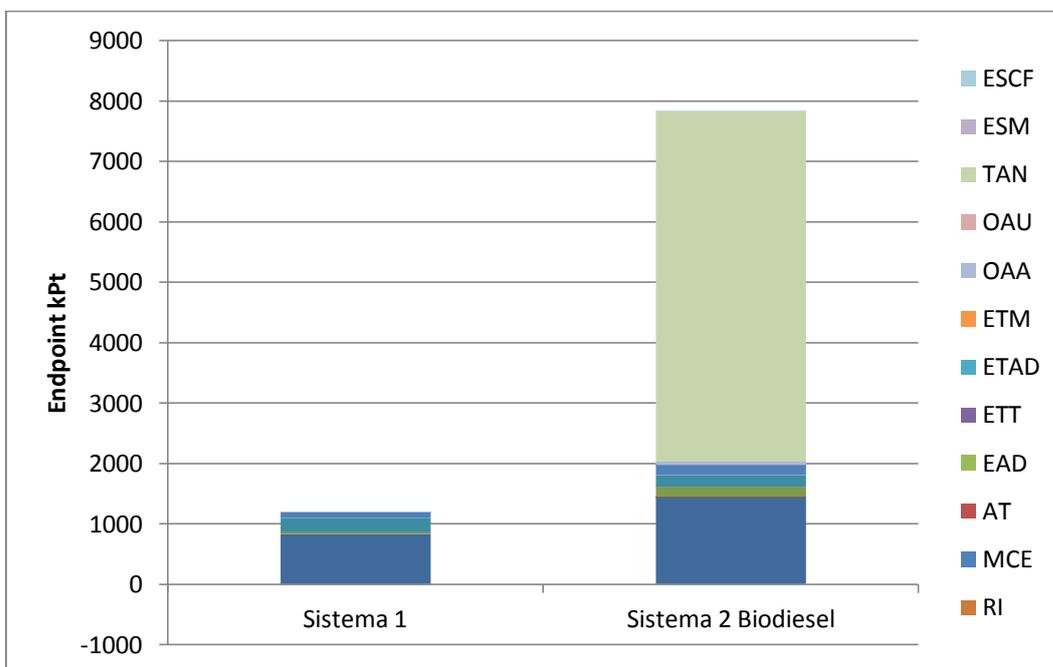


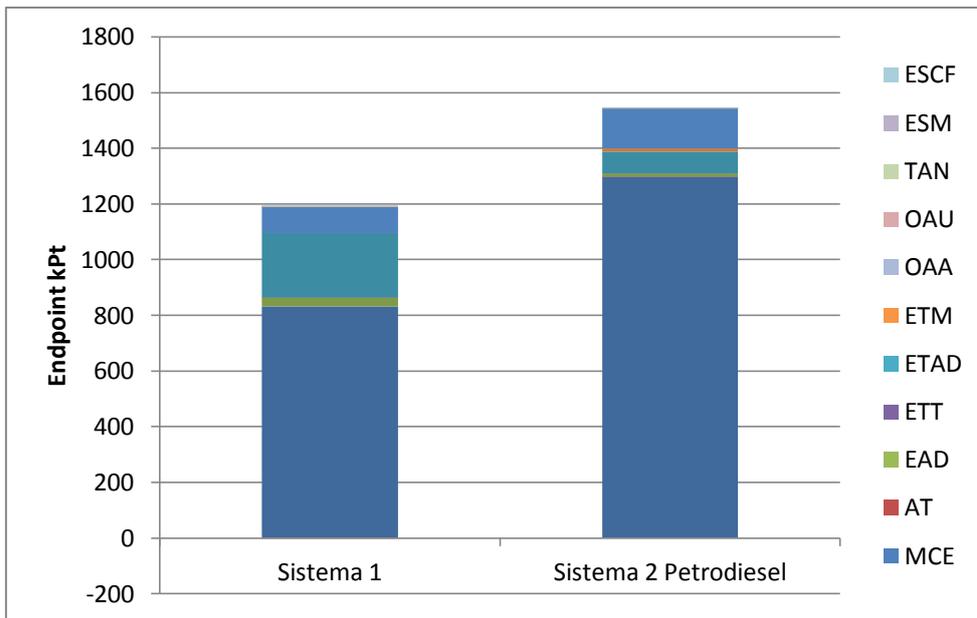
Gráfico 11: Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 2 com biodiesel de soja pelo método Endpoint

**Tabela 19: Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 2 com biodiesel de soja pelo método Endpoint**

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Sistema 1 (kPt)</b>	<b>Sistema 2 Biodiesel (kPt)</b>
Total	1195,315	7823,504
Mudanças Climáticas para Humanidade	830,889	1446,855
Depleção do Ozônio	0,000	0,046
Toxicidade Humana	33,243	169,439
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	0,130	0,067
Formação de Material Particulado	231,837	182,157
Radiação Ionizante	-0,318	11,476
Mudanças Climáticas para Ecossistema	92,315	160,622
Acidificação Terrestre	0,270	0,132
Eutrofização de Água Doce	0,026	0,134
Ecotoxicidade Terrestre	0,001	1,330
Ecotoxicidade de Água Doce	0,013	0,050
Ecotoxicidade Marinha	0,001	0,001
Ocupação de Área Agrícola	0,784	60,408
Ocupação de Áreas Urbanas	1,131	1,337
Transformação de Áreas Naturais	2,151	5787,231
Esgotamento de Metais	0,156	0,430
Esgotamento de Combustíveis Fósseis	2,687	1,787

O sistema 2 apresenta impacto expressivamente maior que o sistema 1, sendo aproximadamente 7 vezes maior o impacto causado. Além de apresentar impacto maior em quase todas as categorias, o sistema 2 conta com um impacto enorme na categoria de transformação de áreas naturais, principalmente da decorrência do uso de vastas áreas para a produção da soja.

Usando o mesmo método de avaliação, deve ser comparado o sistema 1 com o sistema 2 com diesel a partir do petróleo:



**Gráfico 12 : Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 2 com petrodiesel pelo método Endpoint**

**Tabela 20: Comparação de impactos entre sistema 1 e sistema 2 com petrodiesel pelo método Endpoint**

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Sistema 1</b>	<b>Sistema 2 Petrodiesel</b>
<b>Total</b>	<b>1195,315</b>	<b>1544,508</b>
Mudanças Climáticas para Humanidade	830,889	1297,313
Depleção do Ozônio	0,000	0,080
Toxicidade Humana	33,243	11,913
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	0,130	0,039
Formação de Material Particulado	231,837	78,489
Radiação Ionizante	-0,318	11,465
Mudanças Climáticas para Ecossistema	92,315	144,013
Acidificação Terrestre	0,270	0,100
Eutrofização de Água Doce	0,026	0,111
Ecotoxicidade Terrestre	0,001	0,051
Ecotoxicidade de Água Doce	0,013	0,004
Ecotoxicidade Marinha	0,001	0,001
Ocupação de Área Agrícola	0,784	0,316
Ocupação de Áreas Urbanas	1,131	1,239
Transformação de Áreas Naturais	2,151	-2,791
Esgotamento de Metais	0,156	0,420
Esgotamento de Combustíveis Fósseis	2,687	1,747

Observa-se que o sistema 1 apresenta expressiva vantagem sobre o sistema 2, com 23% de redução do impacto ambiental causado. Apesar das incertezas do método e das possíveis variações de inventário, a expressiva vantagem em relação ao sistema 2 é um forte indicativo que o sistema proposto é uma solução para o tratamento de resíduos sólidos urbanos, produção de energia e biocombustíveis com redução nos impactos ambientais.

## 5. Conclusão

A incineração de resíduos sólidos urbanos e a valorização energética dos mesmos, com o posterior uso dos gases de combustão para a produção de microalga são processos altamente sinérgicos e de alto interesse ambiental. Ao total existem quatro pontos de interesse para viabilizar o projeto, a solução do problema espacial do lixo, a geração de energia elétrica, o sequestro de gás carbônico que iria para a atmosfera e a produção de biocombustíveis.

Para conferir o real interesse ambiental no processo proposto, foi realizada a avaliação de ciclo de vida comparativa com aterro sanitário e outras formas de obter a energia e biodiesel em mesma quantidade. Para tal foi utilizado o software SimaPro®, com análises comparativas por categorias de impacto ambiental e também por indicadores únicos para cada sistema. Em geral o processo proposto apresentou menores impactos ambientais na maior parte de diferentes categorias. Quando comparado pelo método Endpoint, com indicador único, o impacto ambiental do processo proposto foi 85% menor que o impacto causado pelo sistema de aterro sanitário e produção de biodiesel da soja, e 23% menor que o impacto causado pelo mesmo sistema de aterro com produção de diesel do petróleo.

Por fim, com base nas comparações de avaliações de ciclo de vida realizadas pode-se concluir que o processo proposto apresenta real interesse ambiental por lidar com processos críticos de impactos ao meio ambiente, como gestão de resíduos sólidos, emissão de efluentes líquidos e gasosos e produção de energia e de biocombustíveis.

## 6. Recomendações

Para próximos estudos recomenda-se a análise econômica de viabilidade do processo em estudo. Apesar de altos custos relacionados ao tratamento de emissões e efluentes, o processo apresenta grandes pontos de interesse financeiro, como produção de energia, tratamento de resíduos sólidos, produção de biocombustíveis e geração de créditos de carbono.

Também são recomendados estudos de diferentes formas de alimentação das microalgas em diferentes meios de cultivo. O cultivo em fotobiorreatores pode apresentar maior capacidade de fixação do CO<sub>2</sub> e outros gases de combustão em função da menor perda dos mesmos para o ambiente, o que pode resultar numa maior fixação do gás carbônico e maior produtividade de microalgas. Além disso, existe uma grande quantidade de subprodutos, como o exemplo o vinhoto da produção de álcool a partir da cana-de-açúcar, que podem ser usados para cultivos mixotróficos e heterotróficos de microalgas, aumentando sua produtividade principalmente nos períodos de menor ou nenhuma incidência solar.

Tanto a área de gestão de resíduos sólidos urbanos quanto a de produção de biocombustíveis apresentam grande potencial de crescimento no cenário brasileiro, e cabem às pesquisas científicas descobrirem potenciais melhorias com resultados expressivos dos pontos de vista ambiental e econômico.

## 7. Referências Bibliográficas

- ALABII A.O., TAMPIER M., BIBEAU E..**Microalgae Technologies & Processes for Biofuels / Bioenergy Production in British Columbia Current Technology & Barriers to Implementation**,2009.
- ARENA U., MASTELLONE M.L., PERUGINI F..**The environmental performance of alternative solid waste management options: a life cycle assessment study**. 2003
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Classificação de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. (NBR ISSO 10004)
- BENEMANN J. **Opportunities and Challenges in Algae Biofuels Production**. 2008.
- BBC - British Broadcasting Corporation. **Waste Incineration**. Disponível em <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/4622484.stm>. Acesso 14 ago 2014
- DOUCHA J., STRAKA F., LIVANSKY K..**Utilization of flue gas for cultivation of microalgae (*Chlorella* sp.)in an outdoor open thin-layer photobioreactor**, 2005
- EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS**. 2008
- EPA – US Environmental Protection Agency. **Life Cycle Assessment: Principles and Practices**, 2006.
- EUROPEAN COMMISSION. **Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on the Best Available. Techniques for. Waste Incineration**.2006
- GARCIA C., CAMACHO F., MIRONI A. SEVILLA J., CHRISTI Y., GRIMA A. **Mixotrophic Production of Marine Microalga *Phaeodactylum tricornutum* on Various Carbon Sources**, 2005.
- GIERÉ R., STILLE P..**Energy, Waste and the Environment: A Geochemical Perspective**, 2004
- GOEDKOOOP M.J., HEIJUNGS R, HUIJBREGTS M., DE SCHRYVER A.;STRUJIS J., VAN ZELM R, **ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation**; 6 January 2009

HAAS, M. J.; MCALOON A. J.; YEE, W. C.; FOGLIA, T. A.; **A Process Model to Estimate Biodiesel Production Costs**; Biosource Technology, 2006, 671-678.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Resíduos Sólidos Urbanos**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/biomassa-contida-nos-residuos-solidos-urbanos>. Acesso 28 jul.2014

PRÉ-SUSTAINABILITY. **ReCiPe**: Disponível em <http://www.pre-sustainability.com/recipe>. Acesso 02 ago.2014

SHEEHAN J., CAMOBRECO V., DUFFIELD J., GRABOSKI M., SHAPOURI H. **.Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus**,1998

THORNTON A. , WEINHART T., BOKHOVE O., ZHANG B., VAN DER SAR D.M., KUMAR K., PISARENCO M., RUDNAVA M., SAVCENCO V., RADEMACHER J., ZIJLSTRA J., SZABELSKA A., ZYPRYCH J., SCHANS M. , TIMPERIO V., VEERMAN F.. **Modeling and optimization of algae growth**, 2010.

ZAKON A., FILHO N., ABREU L.. **Pastilhas e pós cerâmico obtidos das cinzas de incineração de lixo aeroporturário**, 2002