

UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL – UNISC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL
MESTRADO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL

Marcelo de Moura Lima

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE MICROALGAS EM MEIO
EFLUENTE**

Santa Cruz do Sul, fevereiro de 2016

Marcelo de Moura Lima

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE MICROALGAS EM MEIO EFLUENTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental – Mestrado, Área de Concentração em Gestão e Tecnologia Ambiental, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologia Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Dra. Rosana de C. de S. Schneider

Co-orientadora: Prof.^a Dra. Michele Hoeltz

Santa Cruz do Sul, fevereiro de 2016

Marcelo de Moura Lima

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE MICROALGAS
INTEGRADO AO TRATAMENTO DE EFLUENTE DOMÉSTICO**

Esta Dissertação foi submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental – Mestrado, Área de Concentração em Gestão e Tecnologia Ambiental, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologia Ambiental.

Dra. Rosana de Cassia de Souza Schneider
Professora Orientadora – UNISC

Dra. Michele Hoeltz
Professora Co-Orientadora – UNISC

Dr. Diego de Souza
Professor Examinador – UNISC

Dr. Fábio de Farias Neves
Professor Examinador – UDESC

Santa Cruz do Sul, março de 2016.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio e incentivo, especialmente à minha mãe Maria Aparecida e meu pai José Erlon pelo exemplo de vida e valores ensinados. À minha irmã, Jéssica, por me motivar nos momentos difíceis e pelo auxílio na fase de inventário de ciclo de vida.

A minha orientadora Profa. Dra. Rosana de Cassia Schneider e a Profa. Dra. Michele Hoeltz, co-orientadora, pelos ensinamentos, incentivo e por acreditar no meu trabalho. Suas contribuições foram fundamentais para a realização desta pesquisa.

Ao colega e amigo Amaro de Azevedo pela grande ajuda, disponibilidade e presteza ao longo deste trabalho. As suas contribuições foram fundamentais.

Ao Prof. Dr. Ênio Leandro Machado pelas contribuições e orientações prestadas.

A bolsista de iniciação científica Danielle Kochenborger John pelo auxílio realizando alguns experimentos em escala laboratorial e auxiliando no levantamento do inventário de ciclo de vida. Ao Prof. Dr. Fábio de Farias Neves, da UDESC de Laguna, pelo auxílio no levantamento de dados da etapa de cultivo das microalgas.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental da UNISC.

A Capes - Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela bolsa de Mestrado e a UNISC, através do Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental pela infraestrutura disponível.

RESUMO

As microalgas têm sido indicadas para a fixação de carbono e produção de biocombustível destacando, dentre suas vantagens, uma alta eficiência fotossintética, grande produção de biomassa e rápido crescimento comparado a outras culturas para fins energéticos. Desta forma, os métodos de produção baseiam-se em cultivo com condições adequadas ao crescimento em ambiente fotossintético seguido de etapas de separação da biomassa, secagem e de obtenção de subprodutos. Os caminhos de produção podem ser diversos e precisam também ser avaliados quanto aos impactos ambientais que podem ser provocados. A metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) auxilia neste processo. Com isso o objetivo do trabalho foi inventariar e avaliar o ciclo de vida da produção de microalgas em estação de tratamento de efluentes em sistema *raceway*, para escala piloto, utilizando o software *SimaPro 7.3.2*. Como resultado obteve-se que a principal categoria de impacto ambiental foi “cancerígenos”, agrupada na categoria de “Danos à Saúde Humana” onde são observados aspectos como número de anos de vida perdidos ou vividos com incapacidade. O resultado obtido é devido ao alto consumo de energia elétrica. Como foram avaliados três cenários com diferentes condições de produção considerando o cultivo, separação e secagem, foi possível definir que o menor impacto é obtido quando o cultivo é realizado empregando sistema de aeração e movimentação do meio por *blower* ou *paddle wheels* nos *raceways* (com igual impacto) seguido de separação por floculação com adição de hidróxido de sódio e secagem por estufa. O impacto total neste cenário foi de $1,56 \cdot 10^{-2}$ DALYs (anos de vida perdidos ou vividos com incapacidade).

Palavras-chave: Análise de Ciclo de Vida, microalgas, estação de tratamento de esgoto.

ABSTRACT

The microalgae have been indicated to the fixation of carbon biofuel production. Its use has a lot of advantages, such as high photosynthetic efficiency, great biomass production and faster growth to energetic means compared to other cultures. Thus the production methods are based in adequate conditions to growth in photosynthetic ambient and steps of separation of biomass, drying and biomass byproducts obtainment, resulting in many production methods that requires evaluation about the environmental impacts that may be caused. The Life Cycle Assessment (LCA) methodology helps this process. Therefore the objective of this paper was to inventory and analyze the life cycle of microalgae production in effluent treatment plant in raceway system aiming at production of biofuels, to pilot scale, using the *SimaPro 7.3.2* software. According to the experiments result, the main category of environmental impact was “carcinogenic”, which is categorized as “Damage to Human Health”. In this category it can observed aspects of life such as number of years lost or lived with disability. The obtained result is due to high electrical energy consumption. Since three scenarios with different production conditions (considering cultivation, separation and drying) were realized, it was possible to define that the lowest environmental impact occurs in scenario two. In this scenario the cultivation is realized using aeration system and media agitation by blower or paddle wheels in the raceways (same impact in both of them), followed by separation by flocculation with the addition of sodium hydroxide and the use of a dryer. The total impact in this scenario was $1,56 \cdot 10^{-2}$ DALYs (Disability Adjusted Life Years).

Keywords: Life Cycle Assessment, microalgae, wastewater treatment plant.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DALY	<i>Disability Adjusted Life Years</i> (número de anos perdidos mais o número de anos vividos com incapacidade)
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Padronização)
PDF	<i>Potentially Disappeared Fraction</i> (Fração Potencialmente Desaparecida)
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> (Reator anaeróbico de fluxo ascendente)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das etapas do Processo.	24
Figura 2 - Sistema de fronteira do estudo de ACV da produção de microalgas.	26
Figura 3 - Sistema de produção de microalgas do tipo <i>raceway</i> com A) <i>Paddle wheels</i> e B) <i>Blower</i> para aeração e movimentação do meio de cultivo.	29
Figura 4 - Gráfico dos dados normalizados por categoria de impacto para a etapa de cultivo de microalgas.	32
Figura 5 - Categoria de danos em pontuação única para a etapa de cultivo de microalgas.	33
Figura 6 - Caracterização dos impactos ambientais no processo de floculação por adição de hidróxido de sódio.	35
Figura 7 - Pontuação única para as categorias de impacto avaliadas na floculação por adição de hidróxido de sódio.	36
Figura 8 - Categoria de danos em pontuação única para o processo de floculação por adição de hidróxido de sódio.	37
Figura 9 - Caracterização dos impactos ambientais no processo de eletroflotação com eletrodos de ferro.	40
Figura 10 - Pontuação única para as categorias de impacto avaliadas na eletroflotação com eletrodos de ferro.	40
Figura 11 - Caracterização dos impactos ambientais no processo de eletroflotação com eletrodos de alumínio.	41
Figura 12 - Pontuação única para as categorias de impacto avaliadas na eletroflotação com eletrodos de alumínio.	42
Figura 13 - Categoria de danos para o processo de eletroflotação com eletrodos de ferro.	43
Figura 14 - Categoria de danos para o processo de eletroflotação com eletrodos de alumínio.	43
Figura 15 - Caracterização dos impactos ambientais no processo de centrifugação.	45
Figura 16 - Pontuação única para as categorias de impacto avaliadas na centrifugação.	46
Figura 17 - Caracterização dos impactos ambientais no processo de filtração.	48
Figura 18 - Categoria de danos em pontuação única para o processo de filtração.	48
Figura 19 - Caracterização dos impactos ambientais no processo de secagem em estufa.	50
Figura 20 - Pontuação única para as categorias de impacto avaliadas na secagem em estufa.	50
Figura 21 - Cenário 1 em pontuação única para as categorias de impacto.	52
Figura 22 - Caracterização dos impactos ambientais no cenário 1.	52
Figura 23 - Cenário 2 em pontuação única para as categorias de impacto.	54
Figura 24 - Caracterização dos impactos ambientais no cenário 2.	54
Figura 25 - Cenário 3 em pontuação única para as categorias de impacto.	55
Figura 26 - Caracterização dos impactos ambientais no cenário 3.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equipamentos para cultivo de microalgas em estação de tratamento de esgoto.	25
Tabela 2 – Dados para ACV – Cultivo de microalgas em <i>raceway</i> com <i>paddle wheels</i> ou <i>blower</i>	31
Tabela 3 – Dados para ACV – Floculação por adição de hidróxido de sódio.	34
Tabela 4 – Dados para ACV – Eletroflotação com eletrodos de ferro.	38
Tabela 5 – Dados para ACV – Eletroflotação com eletrodos de alumínio.	39
Tabela 6 – Dados para ACV – Centrifugação.	44
Tabela 7 – Detalhes para ACV – Filtração.	47
Tabela 8 – Pontuação dos cenários simulados.	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral.....	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1	Produção de microalgas.....	15
3.2	Aproveitamento da Biomassa.....	20
3.3	Avaliação de Impactos Ambientais	22
4	METODOLOGIA	24
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
5.1	Cultivo de Microalgas.....	29
5.2	Separação da Biomassa	33
5.2.1	Floculação por adição de hidróxido de sódio.....	34
5.2.2	Eletroflotação com eletrodos de ferro ou alumínio.....	37
5.2.3	Centrifugação	44
5.2.4	Filtração	46
5.3	Secagem da biomassa	49
5.4	Comparação de cenários	51
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
7	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

Há uma vasta escala de tecnologias potenciais para captura de CO₂ da atmosfera, onde custo e desempenho devem ser avaliados. Quando se trata da captura deste gás por microalgas outros benefícios também são alcançados e este pode ser um sistema economicamente interessante.

As microalgas têm sido sugeridas como excelentes candidatas para a fixação de carbono e produção de biocombustível destacando, dentre suas vantagens, uma alta eficiência fotossintética, grande produção de biomassa e rápido crescimento comparado a outras culturas para fins energéticos Miao e Wu (2006).

O uso de microalgas para a fixação de carbono e produção de biomassa inclui a habilidade em capturar nutrientes de águas residuais (efluentes) e de emissões gasosas (Perez-Garcia *et al.*, 2011). Além disso, as microalgas têm importância comercial em outras áreas como na nutrição, na química e farmacêutica, dentre outras.

Para o crescimento ótimo das espécies, é necessário uma série de nutrientes, destacando que dependendo das espécies, ocorrem variações relacionadas principalmente à quantidade dos nutrientes no meio. Ainda assim, estas necessidades nutricionais são dependentes de distintas condições ambientais.

Destaca-se também a possibilidade do uso de efluentes para alcançar as taxas de nutrientes necessárias para o crescimento de biomassa. Isso significa barateamento dos custos e gastos com água potável, proporcionando o reuso desta e remoção destes nutrientes. Nesse sentido há fundamentalmente dois grandes benefícios ambientais obtidos junto ao emprego das microalgas: remoção de nutrientes e remoção de metais pesados que possam chegar aos corpos de água regionais.

Ressalta-se ainda que a utilização de microalgas que se desenvolvem naturalmente em águas residuárias, adaptadas às respectivas variações de temperatura e composição iônica, deve resultar numa maior eficiência de remoção de nutrientes, em relação à utilização de espécies comerciais (Monteiro, 2004).

De modo geral, o crescimento e aumento da biomassa de microalgas estão diretamente relacionados com uma série de fatores intrínsecos e extrínsecos. Naturalmente, esses organismos elevam a remoção de nutrientes, contaminantes orgânicos, metais

pesados e patógenos de efluentes domésticos fornecendo matéria-prima interessante para produção de metabólitos ou biocombustíveis (Su *et al.*, 2012).

Um dos fatores que interferem no aumento da produção de biomassa de microalgas é a relação simbiótica entre esses organismos e bactérias, na forma de consórcios que podem ocorrer quando se usa efluentes como meio de cultivo. (Muñoz e Guieysse, 2006).

As culturas consorciadas entre microalgas e bactérias vêm recebendo atenção especial como um biosistema alternativo para o tratamento de efluentes municipais e industriais, principalmente em regiões tropicais e subtropicais onde há uma grande diversidade microbiana em potencial (Godos *et al.*, 2009). A composição do efluente e alteração das condições ambientais influencia fortemente a predominância microbiana interferindo assim na produção de biomassa (Fukami *et al.*, 1997).

Sabe-se de longa data que os micro-organismos são fundamentais na manutenção e preservação para o meio ambiente e na correta sucessão ambiental nos mais variados ecossistemas, além do que contribuem de forma impar com a ciclagem de compostos potencialmente prejudiciais ao ambiente e aos seus habitantes.

Neste sentido o conhecimento das etapas de produção, o domínio da produção em escala piloto e o conhecimento dos impactos ambientais que estes sistemas de produção podem gerar devem ser investigados, visando melhor rendimento de produção de biomassa e uma menor interferência no ecossistema local.

Por outro lado, o aproveitamento da biomassa também têm sido investigado para a produção de inúmeros biocombustíveis, incluindo biodiesel pela extração e transformação do material lipídico, bioetanol produzido a partir da biomassa, açúcares e amido, bem como para a produção de biogás, bio-hidrogênio e outros (Demirbas, M. F., 2011). As microalgas podem produzir de 3-10 vezes mais energia por hectare em comparação com culturas terrestres (Demirbas, 2010).

Resumidamente, em comparação às plantas oleaginosas, as microalgas podem apresentar maior eficiência em produtividade lipídica (algumas espécies alcançam até 80% do peso seco em óleo), reproduzem-se rapidamente e durante todo o ano, requerem menor área de cultivo, além de utilizarem áreas não agriculturáveis, requerem menos água, podem ser cultivadas em água não potável, além de serem CO₂ neutras e sequestrarem CO₂ pré-existente (Singh, Jasvinder e Gu, Sai, 2010).

Neste contexto, a fitorremediação e desenvolvimento de produtos a partir da biomassa pode ser uma alternativa limpa a ser otimizada e é um fator de indução do crescimento da região. Neste caso, a avaliação do ciclo de vida do cultivo, separação e secagem da biomassa de microalga, em escala piloto e em meio efluente, torna-se relevante para definições de produção em empreendimentos futuros.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo avaliar o ciclo de vida da produção de microalgas cultivadas em estação de tratamento de esgotos considerando uma unidade funcional de tratamento de esgoto urbano de 8.000 L.

2.2 Objetivos específicos

- Inventariar etapas e equipamentos necessários para produção de microalgas cultivadas em estação de tratamento de esgoto para a unidade funcional de 8.000 L.
- Realizar a ACV das etapas de produção, separação e secagem da biomassa microalgal por meio do *Software SimaPro* versão 7.3.2.
- Identificar uma configuração produtiva de biomassa de microalgas menos impactante ao meio ambiente.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O aumento da demanda mundial por combustíveis e a crescente preocupação ambiental, especialmente no que diz respeito as consequências dos gases de efeito estufa, têm incentivado a busca por fontes alternativas de energia (Singh, J. e Gu, S., 2010; Pittman, J. K. *et al.*, 2011). As fontes de biomassa são promissoras pela possibilidade de serem convertidas em combustíveis. Várias foram as biomassas identificadas como fontes alternativas de combustíveis energéticos; entre elas os biorresíduos, como por exemplo resíduos de alimentos, resíduos urbanos e resíduos agrícolas; culturas oleaginosas comestíveis e não comestíveis. Recentemente tem ganhado um impulso a análise das possibilidades de utilização de algas como fonte de biocombustíveis (Singh, J. e Gu, S., 2010; Pittman, J. K. *et al.*, 2011).

Aliado a produção de biomassa de microalgas e fitorremediação há o interesse em processos menos impactantes ao meio ambiente quando considerado as entradas e saídas de cada etapa, em uma análise de ciclo de vida.

3.1 Produção de microalgas

As microalgas desenvolvem um grande papel na tarefa de mitigar os efeitos da poluição causada pelo homem, onde atuam como agente de captura de resíduos de CO₂ presentes na atmosfera, diminuindo os efeitos causados pelos gases de efeito estufa (Khan *et al.*, 2009; Ahmad *et al.*, 2011; Kumar *et al.*, 2011).

Sua capacidade de adaptação em águas de reuso, efluentes industriais ou áreas contaminadas lhes confere um importante papel na biorremediação destas áreas, sendo ao mesmo tempo, capazes de gerar produtos e sub-produtos de grande utilidade para a indústria alimentícia, farmacêutica e principalmente geração de biocombustíveis. Além disso, há destaque a capacidade de microrganismos como as microalgas de capturar metais pesados dissolvidos de seus arredores, como por exemplo o ferro. Além disso, níveis relativamente elevados de ferro detectados na amostra de águas residuais foram refletidos na bioacumulação elevada de ferro no tecido. As eficiências do sistema de remoção de ferro atingiram 98 e 96,5% para os sistemas lote e contínuo, respectivamente (Hammouda *et al.*, 1995).

Segundo Khan *et al.* (2009); Ahmad *et al.* (2011); Kumar *et al.* (2011) 1 kg de biomassa seca produzida por microalgas requer cerca de 1,8 kg de CO₂. Khan *et al.* ainda ressaltam uma eficiência para a fixação de CO₂ de 10-50 vezes maior que plantas terrestres.

Microalgas têm sido sugeridas como uma potencial fonte de combustível renovável (De Souza Schneider *et al.*, 2011; Pittman, J. K. *et al.*, 2011). Entretanto para essa fonte se tornar efetiva, a produção de biomassa de microalgas deve apresentar viabilidade econômica. Um método para reduzir custos na produção dessa biomassa é integrar o tratamento de água residual (efluente líquido urbano) com produção de biomassa de microalgas [3]. Os resíduos provenientes dessa fonte são ricos em carbono, nitrogênio e outros minerais, e apresentam potencial para utilização como substrato para o cultivo de microalgas, o que irá reduzir consideravelmente o custo com nutrientes e água (Li *et al.*, 2011).

Muitas espécies de microalgas conseguem crescer com eficiência em águas residuais devido à sua capacidade de utilizar carbono orgânico, nitrogênio e fósforo inorgânicos presentes nessas águas. Um requisito importante no tratamento de águas residuais é a remoção de concentrações elevadas de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo. Se a remoção desses nutrientes não for eficiente pode apresentar risco de eutrofização em corpos hídricos. O fósforo é particularmente difícil de remover de águas residuais. Na maior parte do tratamento comercial, o fósforo é precipitado com uso de produtos químicos para formar uma fração insolúvel sólida. Entretanto o fósforo recuperado por esses métodos não é totalmente reciclável e o precipitado restante é disposto em aterro. As microalgas são eficientes na remoção de fósforo, nitrogênio e metais pesados de águas residuais, portanto, têm papel importante na remediação dessas águas (Pittman, Jon K. *et al.*, 2011).

Quanto aos macronutrientes, as microalgas requerem carbono (C), nitrogênio (N), oxigênio (O), hidrogênio (H) e fósforo (P), além de cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S) e potássio (K). Como micronutrientes, geralmente requerem ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), molibdênio (Mo) e cobalto (Co), enquanto algumas microalgas também necessitam baixas concentrações de vitaminas no meio de cultura (Guillard, 1975). Os principais elementos limitantes do crescimento são o carbono, nitrogênio, o fósforo e o ferro (Richmond, 2004; De Oliveira Lourenço, 2006; Soares, 2010).

Com relação ao processo, a separação da biomassa de microalgas geralmente requer uma ou mais etapas que consideram separação de fases sólido-líquido. Este é um desafio no processo de produção de biomassa de microalgas.

A utilização das microalgas vai além das diversas formas de contribuição para a mitigação da poluição da água e do ar, a produção de microalgas também deve ser realizada de forma limpa. A etapa que mais inspira cuidados na produção da biomassa é a sua separação. Muitos métodos podem ser utilizados para isso, sendo o mais usual a adição de floculantes e tem sido utilizado com maior frequência a eletroflotação.

Os processos envolvidos incluem floculação, filtração, flotação e centrifugação. A seleção da tecnologia de recuperação da biomassa é fundamental para a viabilidade econômica da produção. A escolha da técnica de colheita depende de características da microalga como tamanho, densidade e valor do produto alvo. Geralmente a colheita envolve dois estágios (Brennan e Owende, 2010):

(1) Colheita em massa: destina-se a separação da biomassa em suspensão. Depende da concentração inicial da biomassa e as tecnologias empregadas são floculação, flotação e sedimentação gravitacional;

(2) Espessamento – objetiva-se concentrar a biomassa por meio de técnicas como centrifugação, filtração e agregação ultrassônica. Geralmente é um passo com maior consumo de energia que a colheita em massa.

A floculação faz parte do primeiro estágio da colheita em massa e se destina a agregar as células microalgais. A floculação é uma etapa preparatória antes de outros métodos como filtração, flotação ou sedimentação gravitacional. Uma vez que as células de microalgas carregam uma carga negativa que previne a agregação natural de células em suspensão. A adição de floculantes, como cátions multivalentes ou polímeros catiônicos, reduz ou neutraliza a carga negativa (Brennan e Owende, 2010).

Com relação ao uso de agentes floculantes, são reagentes que possuem impacto ambiental associado. O uso de NaOH por exemplo, é um método barato e rápido (Wu *et al.*, 2015). No entanto o meio deve ser neutralizado para o descarte. Dependendo do agente floculante pode haver modificações no perfil dos ácidos graxos da biomassa. Por outro lado, na eletroflotação os efeitos da separação sobre a biomassa e o efluente a ser descartado não são conhecidos (Gressler *et al.*, 2014).

Este estágio pode ser feito apenas com a sedimentação gravitacional, que é a técnica mais comum de separação de biomassa de algas provenientes de águas residuais devido ao grande volume tratado e ao baixo valor agregado dessa biomassa. No entanto o método é adequado para microalgas grandes (aproximadamente 70 μm) como a *Spirulina* (Brennan e Owende, 2010) e pode não ter a eficiência esperada, bem como, exige maior tempo.

É possível utilizar a flotação com o objetivo de melhorar a separação da biomassa. Esta técnica consiste na separação de células de algas utilizando microbolhas de ar disperso na água, e ao contrário da floculação não necessita de adição de produtos químicos. Apesar da flotação ser mencionada como método potencial de separação de biomassa, há poucas evidências de sua viabilidade técnica ou econômica (Brennan e Owende, 2010).

Outro método de recuperação de biomassa é a eletroflotação. Nesse processo utilizam-se eletrodos de ferro e alumínio; os mesmos sofrem eletrólise da água, onde as microalgas suspensas são desestabilizadas por íons, resultantes da dissolução do ânodo e são flotadas por microbolhas de hidrogênio $\text{H}_2(\text{g})$ gerados no cátodo que capturam em partículas suspensas. A remoção da biomassa eletroflotada pode ser realizada com peneira, nessa etapa pode haver perdas, mas é rápida e eficaz. Entretanto este método gera resíduos de íons metálicos a partir dos eletrodos e também consumo de energia (Baierle *et al.*, 2015).

A eletroflotação pode ser responsável por causar contaminações, devido aos métodos eletrolíticos de remoção de biomassa utilizando, onde são gerados íons de metais a partir dos eletrodos e estes remanescem no meio de cultivo, além do consumo de energia associado a atividade.

Recentemente pesquisas demonstraram que a tecnologia de eletrocoagulação-flotação oferece uma atrativa alternativa para os métodos tradicionais de tratamento de águas com presença de microalgas, com consumo de energia relativamente baixo (Poelman *et al.*, 1997; Ghernaout *et al.*, 2008; Gao, Du, *et al.*, 2010; Gao, Yang, *et al.*, 2010).

Outros estudos também demonstraram que eletrodos de alumínio podem alcançar melhor remoção de microalgas comparado com eletrodos de ferro, obtendo diferenças de remoção de 78,9% para 100% em 45min. Isso se deve provavelmente a maior corrente gerada por eletrodos de alumínio comparados aos de ferro (Gao, Du, *et al.*, 2010).

Em adição ao material do eletrodo, outro parâmetro importante na eficiência do método de eletroflotação é o tamanho dos eletrodos e sua superfície de contato com o

meio. Resultados mostram que a quantidade de produção de micro bolhas é proporcional ao tamanho da superfície do eletrodo (Rahmani *et al.*, 2013).

Além destes fatores, a densidade de corrente é uma das variáveis mais importantes, quanto maior a densidade de corrente, mais microbolhas são geradas, resultando em uma melhor separação e remoção das partículas (Rahmani *et al.*, 2013).

Em sequência às etapas de sedimentação, flotação ou floculação da biomassa no meio de cultivo, há a necessidade de filtração ou centrifugação. O processo de filtração convencional é mais apropriado para separação de microalgas relativamente grandes (> 70 μm) como *Coelastrum* e *Spirulina*. Esse método não é recomendado para microalgas que apresentam dimensões aproximadas de bactérias (< 30 μm) como *Scenedesmus*, *Dunaliella* e *Chlorella*. Para recuperar essas biomassas se apresenta como tecnicamente viável o uso de membrana de microfiltração e ultrafiltração (uma forma de filtração por membrana que utiliza pressão hidrostática). Esses métodos são adequados para células mais frágeis que necessitam de baixa pressão transmembranar e condições de baixa velocidade. Entretanto devido aos custos de substituição de membranas e bombeamento em grandes escalas de produção, a centrifugação pode ser um métodos mais econômico de recuperação de biomassa (Brennan e Owende, 2010).

A recuperação por centrifugação é indicada para obtenção de metabólitos de alto valor. O processo é rápido e requer uso intenso de energia. A recuperação da biomassa depende de características de sedimentação das células, do tempo de suspensão, de residência na centrífuga e volume da mesma. As desvantagens desse método estão nos altos custos energéticos e manutenção. A eficiência fica acima de 95% (Brennan e Owende, 2010; Dassey e Theegala, 2013; Weschler *et al.*, 2014).

O emprego de um ultrassonicador para a separação da biomassa também já foi testado. Ele pode ligar fisicamente uma ou mais partículas por meio de um processo chamado de ponte, facilitando a agregação. A agregação suave induzida acusticamente seguida por sedimentação pode melhorar a colheita de biomassa. A principal vantagem da colheita por ultrassom é que ela pode ser operada continuamente sem provocar tensão de cisalhamento na biomassa, o que poderia destruir metabólitos potencialmente valiosos (Brennan e Owende, 2010).

Após a colheita da biomassa, é necessário empregar uma técnica de desidratação ou secagem. Como a biomassa é perecível, deve ser rapidamente processada após a separação. Os métodos que tem sido utilizados são: secagem ao sol ou em estufa, secagem por pulverização (*spray dryer*) e liofilização (Brennan e Owende, 2010).

A secagem ao sol é o método mais econômico; mas as principais desvantagens incluem longo tempo de secagem, necessidade de grande área e o risco de perda de material (Brennan e Owende, 2010). Já a secagem em estufa acelera o processo e reduz o espaço necessário, no entanto necessita de energia, sendo mais oneroso.

A liofilização é um processo igualmente caro, especialmente para operações em grande escala, mas facilita a extração de óleos. Elementos intracelulares, como os óleos, são difíceis de serem extraídos de biomassa úmida com solventes sem a quebra celular, mas são mais facilmente extraídos por liofilização a partir da biomassa seca (Brennan e Owende, 2010).

A secagem por pulverização (*spray dryer*) geralmente é usada para extração de produtos de alto valor, mas é relativamente caro e pode causar uma deterioração significativa de alguns pigmentos de microalgas porque usa aquecimento para a pulverização (Brennan e Owende, 2010).

3.2 Aproveitamento da biomassa

As microalgas têm importância comercial em diferentes áreas como na nutrição, na química e farmacêutica, dentre outras. Em destaque, representam uma possibilidade real na geração de bioenergia de terceira geração derivada de biomassa, o que as torna capazes de gerar biodiesel, bioetanol, bioquerosene, bioplásticos, biohidrogênio, biogás e intermediários químicos para o setor petroquímico (Singh, Jasvinder e Gu, Sai, 2010; Demirbas, A., 2011).

A composição de carboidratos nas microalgas, principalmente polissacarídeos, pode variar entre cepas podendo atingir até 70% de seu peso seco (Harun e Danquah, 2011). Esta é uma questão que justifica o estudo de diferentes cepas nativas para a produção de biomassa e conseqüente produção de bioetanol. A produção deste biocombustível ocorre

em etapas que variam de acordo com a biomassa utilizada envolvendo pré-tratamento, sacarificação, fermentação e recuperação do produto (Harun e Danquah, 2011).

Segundo John et al. (2011) a importância da confecção de um sistema elaborado e eficiente para o cultivo destes micro-organismos e que possa eliminar compostos que causem impureza no produto final é um fator determinante para o uso de biomassa microalgal para produção de bioetanol.

Para a produção e viabilidade do biodiesel é importante avaliar a quantidade e qualidade do óleo presente na biomassa. Segundo Guschina e Harwood (2006) as proporções, bem como os tipos de ácidos graxos produzidos estão relacionados com a espécie da microalga, composição do meio e do ambiente o qual se desenvolve. Aresta, Dibenedetto e Barbeiro (2005) descrevem que é observado na microalga *Chlorella linum* maiores percentuais de ácidos mirístico, palmítico, oleico e linoleico.

O biodiesel é tipicamente uma mistura de ésteres de ácidos graxos, obtidos por transesterificação de ésteres de óleos ou gorduras. Quando sua origem é animal ou vegetal ele é composto principalmente por ésteres derivados de triacilgliceróis. Atualmente a principal matéria-prima utilizada na produção de biodiesel vem de culturas oleaginosas como soja e palma (Amaro *et al.*, 2012).

As microalgas apresentam potencial para gerar quantidades significativas de óleo e biomassa adequada para produzir biodiesel. Elas apresentam maior produtividade de biomassa do que culturas agrícolas oleaginosas, em termos de área requerida para o cultivo, além de apresentar menor custo de produção. Soma-se a isso o potencial de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em comparação aos combustíveis fósseis.

Outras vantagens adicionais são: (1) apresentam produtividade durante todo o ano; (2) crescem em meio aquoso, mas necessitam menos água que culturas terrestres, reduzindo o impacto sobre as fontes de água; (3) microalgas podem ser cultivadas em águas salobras e terra não-arável, e dessa forma não incorrer em mudança de uso da terra agricultável, minimizando impactos ambientais associados; (4) apresentam um rápido potencial de crescimento; (5) quanto à manutenção e melhoria da qualidade do ar, a produção de biomassa de microalgas pode promover a biofixação de CO₂; (6) os nutrientes requeridos para a produção de microalgas, especialmente nitrogênio e fósforo, podem ser obtidos de águas residuárias; (7) o cultivo de algas não requer aplicação de herbicidas ou pesticidas.

O uso de microalgas pode ser expandido para combinar biorremediação e produção de biocombustíveis. A pesquisa e o desenvolvimento da produção de microalgas nos efluentes urbanos ou industriais envolve princípios do desenvolvimento sustentável e tecnologias limpas priorizando medidas preventivas e de remediação (Schneider *et al.*, 2012; Pacheco *et al.*, 2015).

3.3 Avaliação de Impactos Ambientais

A ACV consiste numa metodologia de análise comparativa e avaliação de impactos ambientais de produtos, processos e serviços. Nesse método todos os passos importantes no ciclo de vida do objeto de estudo estão incluídos na análise, como a extração da matéria-prima do ambiente, a produção dos materiais ou produtos, seu uso e o destino dos resíduos ou reciclagem (Varanda *et al.*, 2011; Pieragostini *et al.*, 2012; Pawelzik *et al.*, 2013).

As primeiras ACV foram realizadas entre 1970 e 1990. Consistiam basicamente de inventários de ciclo de vida (ICV) e uma forma rudimentar de análise de impactos. A ênfase era dada à economia de energia e conservação de recursos, e não na poluição (Klöpffer e Curran, 2014).

A estrutura da ACV consiste em quatro fases:

- 1) Definição de objetivos e escopo;
- 2) Inventário de ciclo de vida (ICV) de fluxos de entradas e saídas de materiais e energia;
- 3) Avaliação de impacto (saúde humana, qualidade do ecossistema e esgotamento de recursos);
- 4) Interpretação dos resultados.

Padronizações internacionais para ACV vem sendo desenvolvidas desde a década de 1990 como parte da família ISO 14000 de normas de gestão ambiental (Finkbeiner, 2012).

A norma Iso-14040 (2006) padroniza os estudos de ACV. Ela apresenta os princípios e a estrutura para ACV. A norma Iso-14041 (2006) estabelece a definição de objetivo e escopo. Nessa norma também está definida a “análise de inventário” que estabelece os procedimentos de cálculo para que se possa facilitar o agrupamento destes dados em

categorias ambientais. Nessa etapa ocorre o balanço de massa e energia dos processos de entradas e saídas.

A norma Iso-14042 (2000) trata da avaliação de impactos ambientais na ACV. Essa norma aborda a identificação e avaliação dos potenciais impactos ao meio ambiente que estão associados aos dados levantados no inventário. Ela propõe uma estrutura para a ACV em três etapas: seleção e definição das categorias; classificação dos dados nas diversas categorias selecionadas; e caracterização dos dados modelados, de forma que cada um possa ter um indicador numérico. A conversão dos dados é feita através de fatores de normalização e ponderação.

A norma Iso-14043 (2000) trata da interpretação dos resultados da ACV, enquanto a norma Iso-14044 (2006) trata dos requisitos e diretrizes de uma ACV.

Apesar das vantagens de realizar um estudo de ACV, a técnica apresenta algumas limitações. Uma delas, e de extrema importância, é que as bases de dados são geralmente de países europeus e da América do Norte (Coelho, 2009). Outras limitações estão relacionadas a escolha da metodologia e na incerteza em descrever o mundo real. Em estudos sobre energias renováveis que utilizam ACV as principais limitações citadas são (Bicalho *et al.*, 2012):

- 1) A escolha da unidade funcional;
- 2) O dimensionamento espacial;
- 3) A medição temporal;
- 4) Alocação ou categorização da geração de co-produtos;
- 5) A não inclusão de certos impactos ambientais.

4 METODOLOGIA

Para a realização da Análise do Ciclo de Vida de microalgas cultivadas em estação de tratamento de efluentes, proposto neste trabalho, realizou-se um levantamento de dados por meio de revisão de literatura e produção de informações complementares obtidas em testes de escala laboratorial. O escopo da análise compreendeu as etapas de produção de microalgas, separação da biomassa e secagem da mesma conforme fluxograma apresentado na Figura 1. A ACV foi realizada com o software *SimaPro* versão 7.3.2.

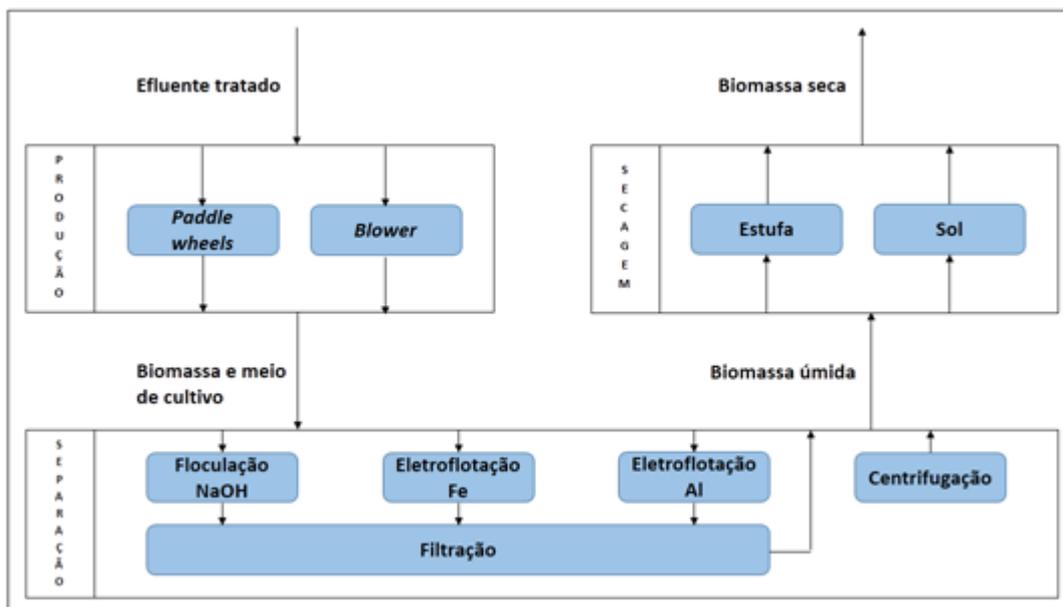


Figura 1 - Fluxograma das etapas do Processo.

O Inventário do Ciclo de Vida (ICV) baseou as informações na configuração dos equipamentos necessários para a obtenção da biomassa de microalgas. Foi realizada pesquisa de equipamentos para obter dados de consumo de energia, rendimento, dimensões e outros. A Unidade Funcional estabelecida para este estudo foi de 6.400 L de efluente líquido. Os equipamentos considerados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Equipamentos para cultivo de microalgas em estação de tratamento de esgoto.

Processo	Equipamento	Marca/Modelo	Especificações
Produção de microalgas	Motorreductor	Motor WEG / Redutor Transtecno	Motor para movimentação dos <i>paddle wheels</i> composto por dois conjuntos com 6 pás cada, sendo um para cada tanque. Motorreductor 1:30; potência 1 CV, consumo 0,75 kWh.
	Blower	Motor WEG	Soprador. Potência de 2 CV ou 1,5 kWh.
	Bomba de drenagem	Schneider BCS S1	Bomba submersa para drenagem do tanque. Potência 0,17 CV, consumo 0,12 kWh.
Separação da biomassa	Tanque para mistura e separação da biomassa	Indupropil	Tanque cilíndrico em polipropileno com capacidade útil de 1.000 L para realizar mistura nas etapas de floculação e eletroflotação.
	Fonte	Asstek	Fonte de alimentação elétrica; potência 0,5 CV ou 0,36 kW.
	Agitador mecânico	Agimix / AGX Coluna	Agitador mecânico para líquidos com guincho manual catracado. Para volumes de até 1.000 L; Potência 3 CV; consumo 2,2 kWh.
	Centrífuga	Evodos / Evodos 10	Rendimento 750 L h ⁻¹ . Potência 4 HP; consumo máximo 3 kWh.
Secagem da biomassa	Estufa para secagem com circulação de ar horizontal	Tecnal / TE-394/5-MP	Ventilação interna no sentido horizontal. Temperatura: ambiente +7°C a 70°C. Potência: 1,1 kW. Volume interno: 1460 L. Dimensões internas: L = 1.380 x P = 720 x A = 1.820 mm. Capacidade: carrinho para 11 bandejas distantes 140 mm entre si.

A fronteira do sistema está apresentada na Figura 2, onde são delimitadas as etapas consideradas neste estudo.

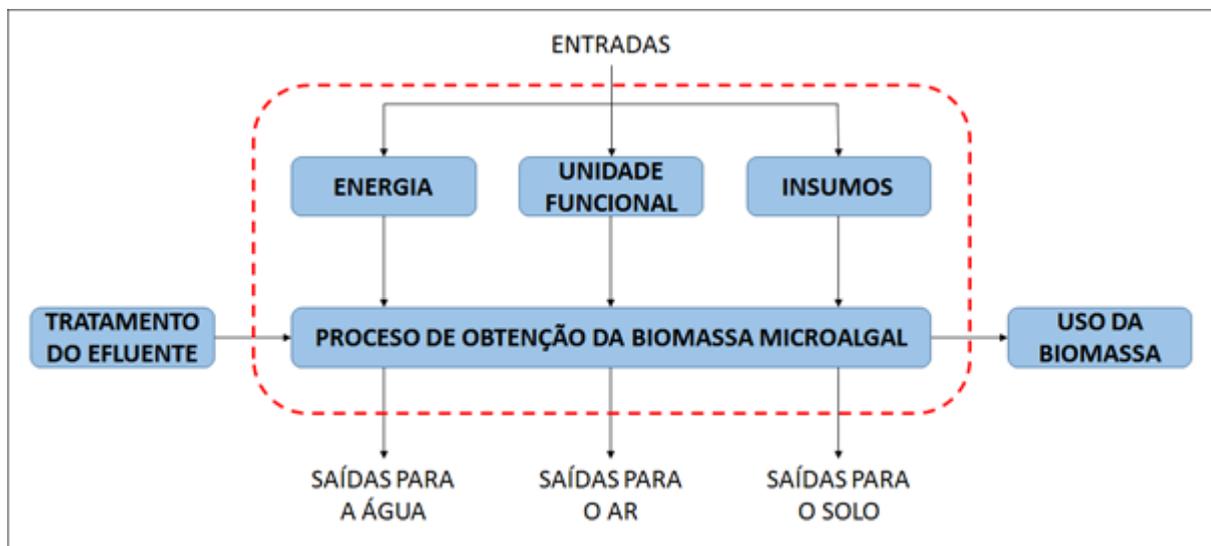


Figura 2 - Sistema de fronteira do estudo de ACV da produção de microalgas.

Após a formulação do ICV foram alimentados os dados de entradas e saídas de cada processo no *SimaPro* utilizando a base de dados *EcolInvent*. O método escolhido foi o *EcolIndicator 99* onde foram avaliadas as seguintes categorias de danos: Danos à Saúde Humana; Danos à Qualidade do Ecossistema e Danos aos Recursos Naturais.

Danos à Saúde Humana: essa categoria expressa o número de anos perdidos mais o número de anos vividos com incapacidade. Unidade: *DALYs* – *Disability Adjusted Life Years* (Anos de vida perdidos ou vividos com incapacidade).

Danos à Qualidade do Ecossistema: expressa a perda de espécies vegetais em uma determinada área num certo período de tempo. Unidade: $\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{y}^{-1} \cdot \text{r}^{-1}$ – *Potentially Disappeared Fraction* (Fração Potencialmente Desaparecida - $\text{m}^2/\text{ano}/\text{kg}$ emissão).

Danos aos Recursos Naturais: expressa a energia necessária para a extração de minerais e combustíveis fósseis consumidos no processo. Unidade: *MJ Surplus* (Megajoule excedente).

Essas 3 categorias citadas são representativas das categorias gerais do método *EcolIndicator-99*, que avalia os impactos ambientais através de onze categorias de impacto.

Carcinogênicos: Expressa os efeitos das emissões de substâncias carcinogênicas nas emissões para o ar, água e solo. Unidade: *DALYs*.

Orgânicos respiráveis: Expressa os efeitos causados pelas emissões de substâncias orgânicas para a atmosfera. Consideradas emissões de verão. Unidade: DALYs.

Inorgânicos respiráveis: Expressa os efeitos causados pelas emissões de substâncias inorgânicas como material particulado, enxofre e óxidos de nitrogênio para a atmosfera. Consideradas emissões de inverno. Unidade: DALYs.

Mudanças climáticas: Expressa os danos resultante do aparecimento de doenças e mortes causadas por mudanças climáticas. Unidade: DALYs.

Radiação: Expressa os efeitos causados por radiações. Unidade: DALYs.

Camada de ozônio: Expressa os danos causados pelo aumento das emissões de gases que destroem a camada de ozônio. Unidade: DALYs.

Ecotoxicidade: Expressa a deterioração da qualidade dos ecossistemas pela emissão de substâncias tóxicas para o ar, solo e águas. Unidade: $\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{y}^{-1} \cdot \text{r}^{-1}$.

Acidificação/Eutrofização: Expressa a deterioração dos ecossistemas devido às emissões de substâncias acidificantes: Unidades: expressa em $\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{y}^{-1} \cdot \text{r}^{-1}$.

Uso do solo: Expressa o impacto na biodiversidade causado pela atividade que cause danos por conversão ou ocupação do solo: Unidade: $\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{y}^{-1} \cdot \text{r}^{-1}$.

Minerais: Expressa o excedente de energia causado pela redução das reservas minerais. Unidade: MJ excedente.

Combustíveis fósseis: Expressa o excedente de energia extraída como resultado da redução da qualidade dos recursos. Unidade: MJ excedente.

As três etapas consideradas no escopo apresentavam alternativas de métodos. Na etapa de produção de microalgas, as alternativas selecionadas para este trabalho foram produção em *raceway* utilizando *paddle wheels*, que consiste em um conjunto de pás movimentando a massa hídrica em um reservatório aberto. A segunda alternativa metodológica para a produção de microalgas consiste na utilização de *raceway* com *blower*, ou seja, sopradores espalhados pelo reservatório fazem a movimentação da massa hídrica. Na etapa de separação da biomassa foram considerados quatro métodos para avaliação de ciclo de vida: floculação por hidróxido de sódio, eletroflotação com eletrodos de alumínio, eletroflotação com eletrodos de ferro e centrifugação. Os processos de floculação e eletroflotação são seguidos de filtração. Para a secagem foram selecionadas duas alternativas: secagem ao sol e secagem em estufa.

Após a avaliação dos impactos gerados por cada um dos métodos supracitados foram montados cenários com algumas dessas metodologias e realizadas novas simulações visando verificar os impactos ambientais resultantes no software *SimaPro*.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A caracterização dos impactos ambientais na produção de biomassa de microalgas foi realizada considerando, isoladamente, etapas de cultivo, separação e secagem. Após foram simulados diferentes cenários, mais adequados a produção, sob os critérios de exequibilidade e menor impacto ambiental.

5.1 Cultivo de Microalgas

O sistema de produção de microalgas considerado neste estudo foi o de *raceway*. Os dados de volume do meio de produção, equipamentos utilizados e consumo de energia dos mesmos foram baseados em sistema implantado e em operação no Laboratório de Cultivo e Biotecnologia de Algas (LCBA), Figura 3, do Departamento de Engenharia de Pesca (DEP) da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), campus de Laguna. A microalga utilizada nessa instituição é a *Chlorella* sp. cultivada com fertilizante Kristalon da marca Yara que apresenta relação NPK 15:5:30 na concentração de 1 g/L. O sistema prevê o uso de quatro tanques com capacidade de 2.000 L cada, totalizando 8.000 L.



Fonte: www.udesc.br/arquivos/id_submenu/2261/14.pdf

Figura 3 - Sistema de produção de microalgas do tipo *raceway* com A) *Paddle wheels* e B) *Blower* para aeração e movimentação do meio de cultivo.

No sistema instalado dois tanques movimentam o meio de cultivo através de um motor marca WEG modelo Redutor Transctecno ligado à *paddle wheels*; dois conjuntos com seis pás cada, um para cada tanque. Os outros dois tanques fazem a movimentação do meio de cultivo através de um *blower* também da marca WEG. Os dados dos referidos equipamentos estão discriminados na Tabela 1.

Para alcançar a capacidade de 8000 L se considerou dois caminhos para a etapa de cultivo de microalgas. O primeiro considerou os quatro tanques movidos por dois motorreductores movimentando quatro conjuntos *paddle wheels*. O segundo considerou os quatro tanques utilizando o mesmo *blower* já que o equipamento apresenta capacidade para esse fim. Nos dois caminhos o sistema funcionaria 24 horas por dia, durante 10 dias.

Após esse período, o meio com as microalgas deve ser removido com uma bomba submersa. Os dados desse equipamento estão apresentados na Tabela 1. Segundo informações da equipe do LCBA para drenar completamente cada tanque é necessário um tempo de 40 à 60 minutos. Entretanto para este trabalho foi considerada a drenagem de 80% da capacidade total de cada tanque, permanecendo 20% de meio e biomassa para servir de meio inicial para a próxima batelada. Portanto seria drenado de cada tanque 1.600 L. Para definição das entradas e saídas do processo se considerou o tempo de drenagem total de 60 minutos e o respectivo consumo do equipamento nesse período.

Para o ICV da etapa de produção de microalgas em *raceway* utilizando *paddle wheels* ou *blower* foi considerado o consumo de energia elétrica no processo e o uso de água, oriunda do efluente, como meio de cultivo das microalgas no volume de 6.400 L ou 6.400 kg.

Assim, a energia consumida pelos equipamentos foi para a movimentação e aeração do meio líquido. Quando utilizado *paddle wheels* esta energia consumida pelo uso de motores com potência 0,75 kW cada x 2 motores x 240 horas, correspondeu a 360 kWh. Com o uso de *blower* o valor encontrado foi o mesmo porque foi considerado um motor com potência de 1,5 kW x 240 horas.

Também foi empregada uma bomba de drenagem, a qual é de 0,12 kW e foi utilizada por 1 hora, alcançando um consumo de 0,12 kWh. Considerando os quatro tanques o consumo equivale a 0,48 kWh.

Dessa forma, o consumo de energia calculado no cultivo de microalgas em ambos métodos foi de 360,48 kWh, como apresentado na Tabela 2.

Como o meio de cultivo é efluente o insumo considerado para o cultivo de microalgas foi a água, uma vez que ela apresenta alguns nutrientes importantes para o crescimento das microalgas (Pittman, Jon K. *et al.*, 2011). Neste momento, estes nutrientes não são considerados insumos para o cultivo.

Tabela 2 – Dados para ACV – Cultivo de microalgas em *raceway* com *paddle wheels* ou *blower*.

Processos	Quantidade	Detalhes para ACV (Biblioteca <i>SimaPro7.3.2</i>)*	Detalhes para ACV (Base de dados)**
Produção de microalgas	6.400 L	Unidade Funcional	-----
Consumo de energia	360,48 kWh	<i>Electricity, high voltage, production BR, at grid/BR U</i>	<i>EcolInvent unit processes</i>
Entrada materiais	6.400 kg ^{3***}	<i>Water, completely softened, at plant/RER U</i>	<i>EcolInvent unit processes</i>

* Nome da biblioteca e da base de dados mantidos em inglês conforme software *SimaPro*; ** Nome do banco de dados mantido em inglês conforme software *SimaPro*; *** Efluente do meio de cultivo com massa específica próxima à $1,0 \text{ kg m}^{-3}$.

No cultivo de microalgas empregando *raceway* com *paddle wheels* ou *blower* a caracterização dos impactos ambientais foi a mesma e pode ser visualizada no gráfico da Figura 4. O impacto em todas as 11 categorias analisadas foi relacionado ao uso de energia elétrica.

O emprego de água (do efluente) não é observado como um impacto na maioria das categorias. Observa-se a contribuição apenas para categorias de “minerais” com 6,68%, e “ecotoxicidade” com 4,46%.

Os impactos gerados por categorias de danos podem ser visualizados no gráfico da Figura 5 apresentados em pontuação única. Da mesma forma é visível que os danos causados por esta etapa do processo estão relacionados a saúde humana devido ao uso de energia elétrica.

Segundo a Aneel (2014), no ano de 2013 o Brasil apresentava uma capacidade real instalada de geração de energia elétrica de 126.754,60 MW. As usinas hidrelétricas representavam a principal fonte respondendo por 63,9% da potência instaladas; termelétricas 28,7%; pequenas centrais hidrelétricas 3,7%; usinas termonucleares 1,6%; centrais geradoras eolielétricas 1,9% e as centrais geradoras hidrelétricas 0,2%.

Dessa forma o país apresenta um *mix* de geração de energia elétrica bem variado. Um dos insumos utilizados na geração de energia é o bagaço da cana-de-açúcar. Segundo Coelho (2009) esse insumo é o principal contribuinte para a categoria “cancerígenos” porque fertilizantes à base de fosfato, como P_2O_5 , utilizado na fertilização contém arsênico. Esta informação é apresentada pela autora a partir de estudos realizados com dados da Europa e de outros países.

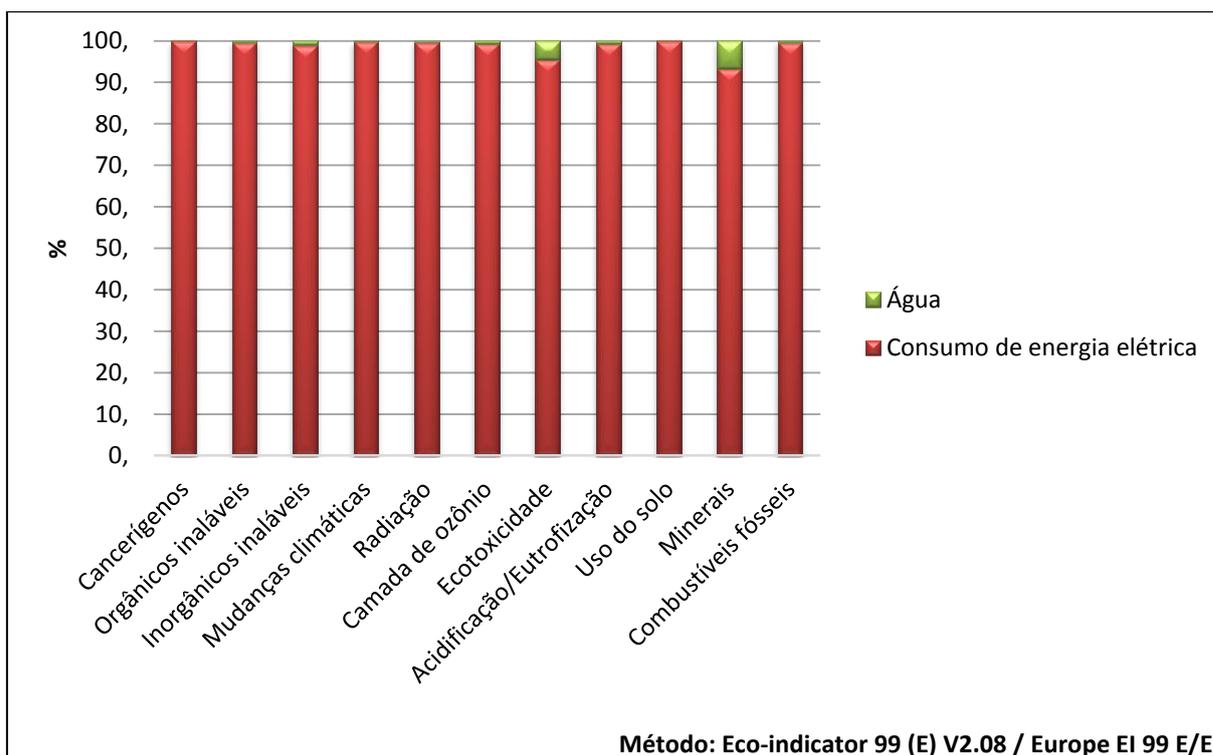


Figura 4 - Gráfico dos dados normalizados por categoria de impacto para a etapa de cultivo de microalgas.

Como os resultados observados no inventário são os mesmos para os dois sistemas, de aeração (*blower*) e movimentação mecânica do meio (*paddle wheels*), o impacto em cada categoria não muda. Desta forma, a decisão por implantação de um ou de outro sistema dependerá da disponibilidade de espaço físico, valores dos equipamentos e eficiência de biomassa produzida. Acrescenta-se também que os sistemas podem ter configurações diferentes da que foi estudada nesta pesquisa, e portanto, os rendimentos podem ser aumentados, conforme apresentou Schoepp *et al.* (2014) para o uso de *blowers*.

A empresa Seambiotic, uma companhia de produção comercial de algas, localizada em Ashkelon, Israel, tem uma planta instalada de *raceway* movimentada por *paddle wheels* cuja média anual de produtividade é de 3 g/m²/dia (Passell *et al.*, 2013).

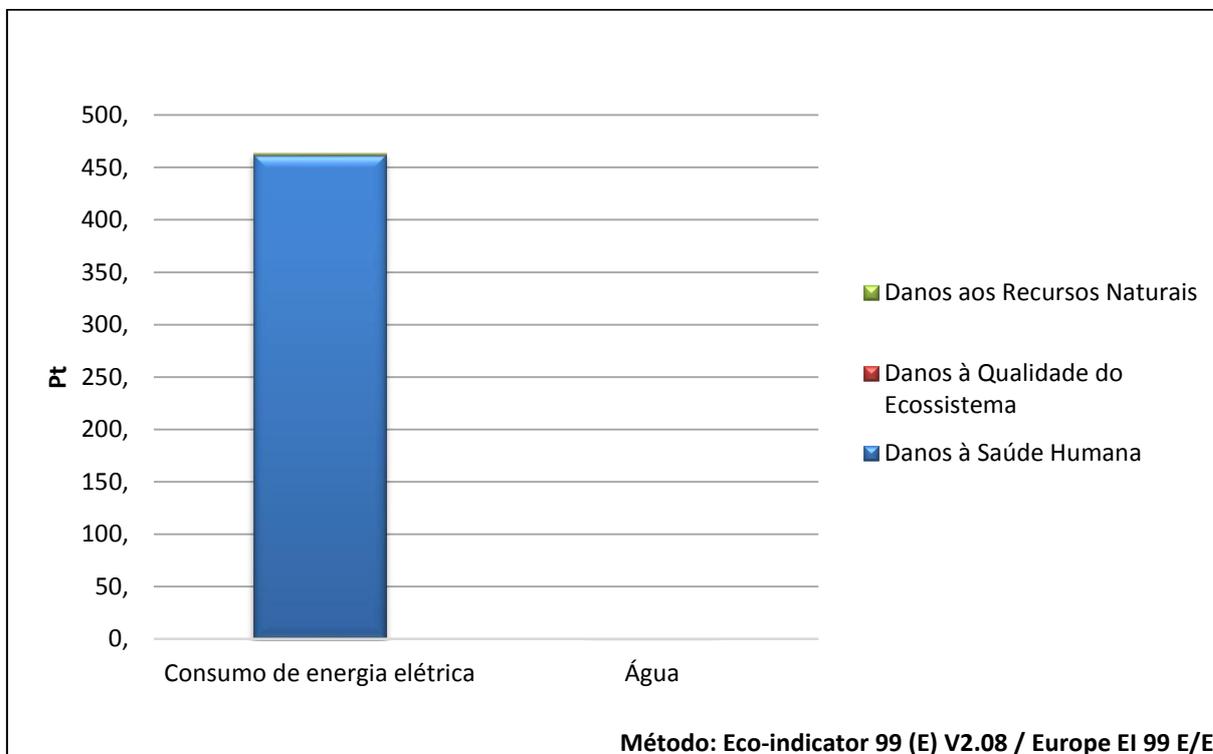


Figura 5 - Categoria de danos em pontuação única para a etapa de cultivo de microalgas.

5.2 Separação da Biomassa

Após o cultivo, o meio é drenado para um tanque onde ocorre a etapa de separação da biomassa. Nesse estudo, se subdividiu em quatro caminhos para promover a separação da biomassa e assim, avaliar o impacto ambiental de cada, para após definir quais serão indicadas para ser consideradas em cenários de avaliação.

Os caminhos escolhidos foram: a) floculação por adição de hidróxido de sódio; b) eletroflotação com eletrodos de ferro; c) eletroflotação com eletrodos de alumínio; e d) centrifugação. Após a floculação ou eletroflotação há filtração com filtro de algodão, cujo objetivo é recuperar a biomassa. Na técnica de centrifugação não há utilização de filtração.

O ICV foi então apresentado quanto as entradas e saídas de modo individual para cada método considerado.

5.2.1 Floculação por adição de hidróxido de sódio

A separação de biomassa por adição de hidróxido de sódio foi testada em escala laboratorial utilizando 5 mL de solução à 6 mol L⁻¹ para 1 L de meio com *Desmodesmus* sp.

Para a unidade funcional proposta, 6.400 L, se considerou a adição de 32 L de solução de hidróxido de sódio, ou 15,36 kg da substância. Esta etapa é prevista para ser realizada em seis bateladas de 1.000 litros e uma de 400 litros, totalizando os 6.400 litros de efluente. O tempo de detenção é de 20 minutos. Para neutralizar o efluente resultante desse processo se considerou a adição de 1,25 kg de ácido sulfúrico. As saídas, ou seja, resíduos e emissões para tratamento desta etapa, equivalem à 6,4 m³. Os dados desta etapa estão apresentados na Tabela 3. Para o hidróxido de sódio foi selecionado na biblioteca do *SimaPro* a opção “*Sodium hydroxide, 50% in H₂O, production mix, at plant/RER U*” e realizada a devida conversão resultando nos 15,36 kg simulados.

Tabela 3 – Dados para ACV – Floculação por adição de hidróxido de sódio.

Processos	Quantidade e	Detalhes para ACV (Biblioteca <i>SimaPro</i> 7.3.2)*	Detalhes para ACV (Base de dados)**
Efluente	6.400 L	Unidade Funcional	-----
Entrada materiais	15,36 kg	<i>Sodium hydroxide, 50% in H₂O, production mix, at plant/RER U</i>	<i>EcoInvent unit processes</i>
Entrada materiais	1,228 kg	<i>Sulphuric acid, liquid, at plant/RER U</i>	<i>EcoInvent unit processes</i>

* Nome da biblioteca e da base de dados mantidos em inglês conforme software *SimaPro*; ** Nome do banco de dados mantido em inglês conforme software *SimaPro*.

A Figura 6 apresenta a caracterização dos impactos ambientais no processo de floculação por adição de solução de hidróxido de sódio. Todas as categorias apresentaram impactos devido ao uso de hidróxido de sódio no processo. O ácido sulfúrico utilizado na neutralização do meio também foi responsável por geração de impactos ambientais, principalmente nas categorias “inorgânicos inaláveis” com 11,93% e “acidificação/eutrofização” com 10,32%. Nesta etapa não há uso de energia, logo o impacto está relacionado somente a adição de insumos químicos.

Em Bangkok, na Tailândia, foi realizado um estudo de ACV comparando o uso de dois catalizadores diferentes, hidróxido de sódio e hidróxido de potássio, no processo produtivo de biodiesel de *Jatropha*. Os resultados obtidos com o software SimaPro usando o método Ecoindicator 99 mostraram que o uso de hidróxido de sódio apresenta maiores impactos ambientais à saúde humana e ao ecossistema (Kaewcharoensombat *et al.*, 2011).

Um estudo de ACV realizado por Monteiro (2008) para avaliar os impactos ambientais relacionados à produção de superfosfato simples apresentou uma grande carga ambiental devido ao emprego de ácido sulfúrico para solubilização do concentrado fosfatado nos estágios de produção e transporte marítimo do enxofre e também no processo produtivo do ácido sulfúrico.

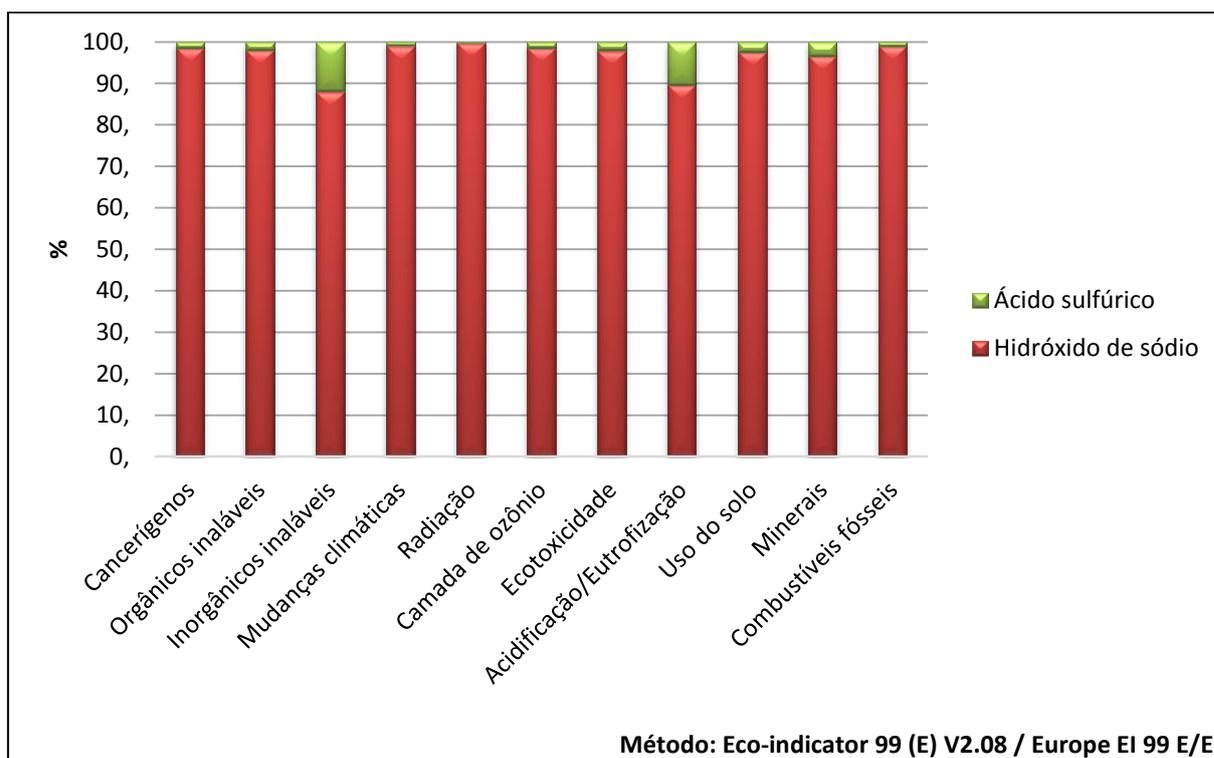


Figura 6 - Caracterização dos impactos ambientais no processo de floculação por adição de hidróxido de sódio.

O resultado em pontuação única pode ser observado na Figura 7. Neste gráfico destaca-se que as principais categorias impactadas, devido ao uso de hidróxido de sódio, foram “combustíveis fósseis”, “inorgânicos inaláveis”, “carcinogênicos” e em menor proporção “mudanças climáticas”.

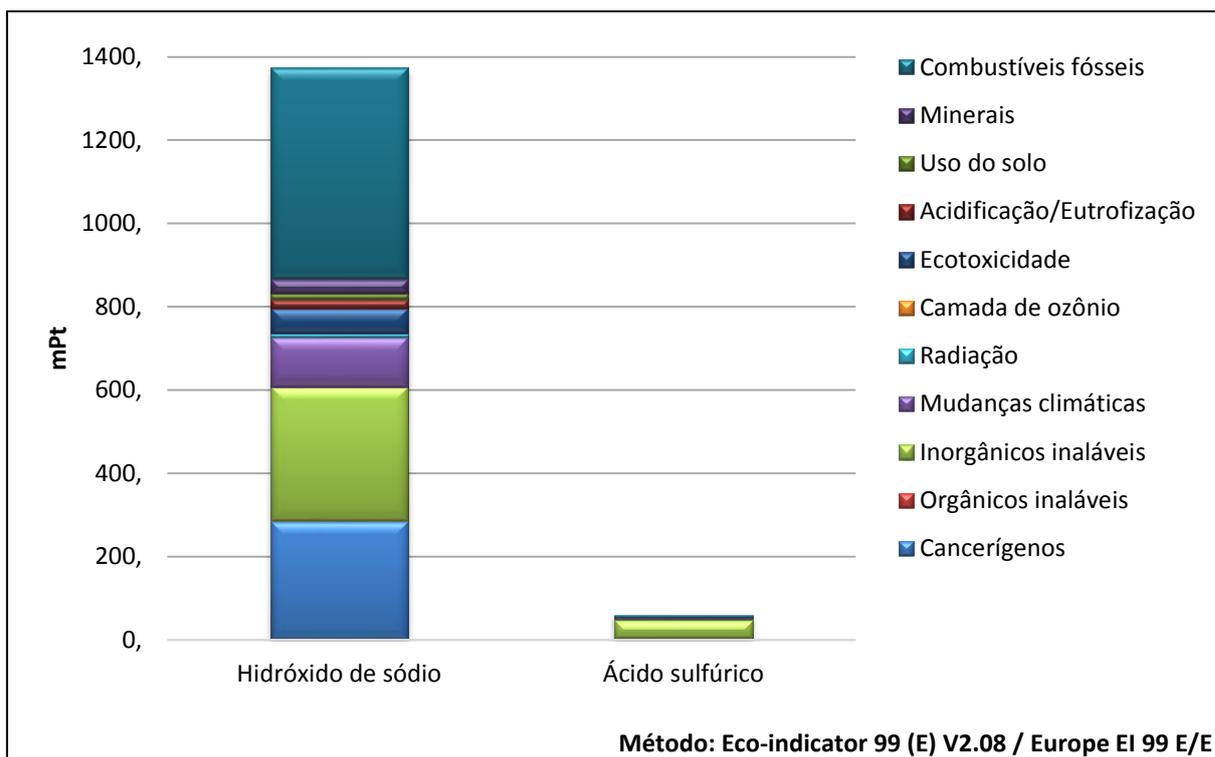


Figura 7 - Pontuação única para as categorias de impacto avaliadas na floculação por adição de hidróxido de sódio.

Os resultados por categorias de danos, em pontuação única, para o método de floculação por adição de solução de hidróxido de sódio são apresentados no gráfico da Figura 8. Pode-se observar que a ACV deste método de separação apresenta mais impactos para a categoria “danos à saúde humana” com 735 mPt. A categoria “danos aos recursos naturais” apontou 541 mPt.

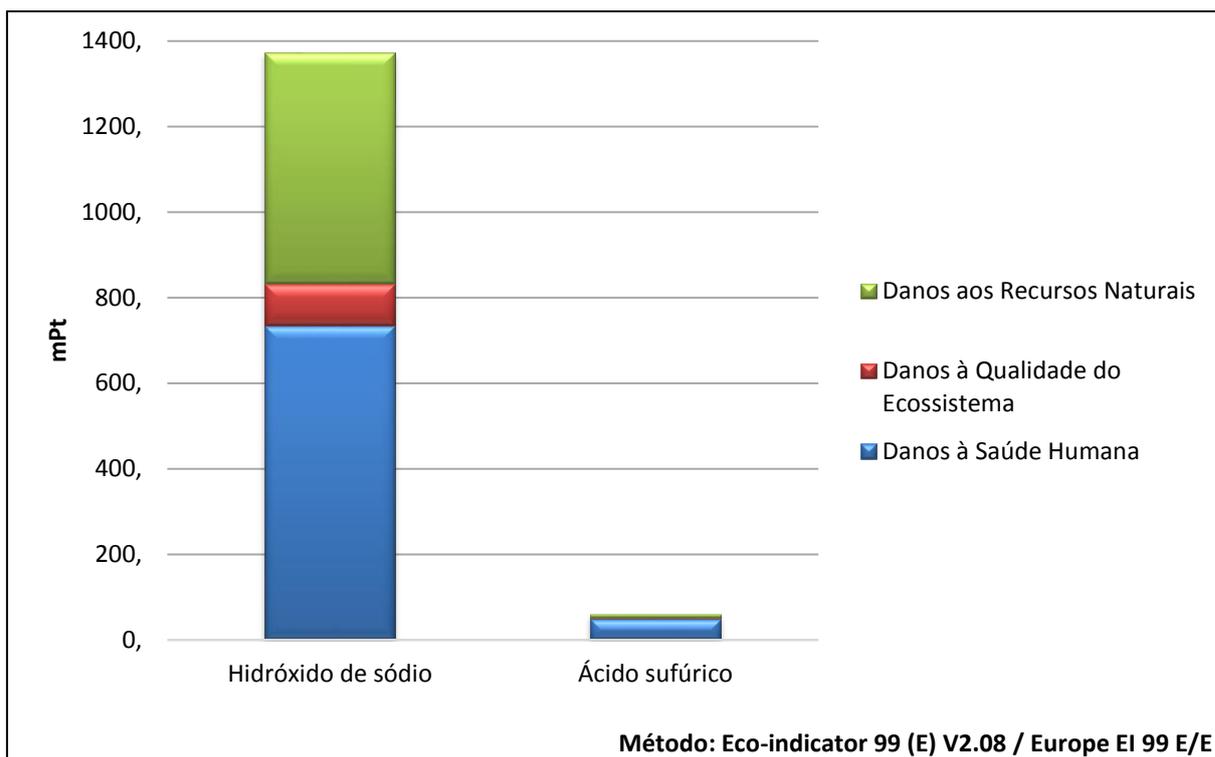


Figura 8 - Categoria de danos em pontuação única para o processo de floculação por adição de hidróxido de sódio.

5.2.2 Eletroflotação com eletrodos de ferro ou alumínio

Para esta etapa foi selecionada uma fonte de energia elétrica com potência de 0,36 kW. A corrente elétrica de saída e o tempo de aplicação da mesma foi baseado no estudo de otimização de Baierle *et al.* (2015), onde se aplicou uma corrente elétrica de saída de 3A por 30 min para eletrodos de ferro, e para os eletrodos de alumínio a mesma corrente elétrica por 20 min. O processo requer a utilização de um agitador mecânico, logo foi selecionado o equipamento da marca Agimix, modelo AGX Coluna, com capacidade de agitar volumes de líquidos de até 1.000 L. A potência do equipamento é de 3 CV, ou 2,2 kW. Para eletroflotar os 6.400 L de efluente o volume deve ser fracionado em sete bateladas.

Assim sendo os dados de entradas e saídas do processo de eletroflotação com eletrodos de ferro para ACV consideraram a energia elétrica, a massa dos eletrodos consumida no processo e o efluente resultante a ser tratado.

Para o cálculo de consumo de energia elétrica se considerou a potência da fonte 0,36 kW x 30 minutos resultando 0,18 kWh. O agitador mecânico com potência de 2,2 kW utilizado por 30 minutos resultou em consumo de 1,1 kWh. A energia do método de

eletroflotação com eletrodos de ferro foi 1,28 kWh para cada batelada. Multiplicando esse valor pelas sete bateladas previstas no estudo, o consumo total de energia seria de 8,96 kWh, como apresentado na Tabela 4.

Se considerou como material de entrada a massa dos eletrodos de ferro que ficaram depositados na biomassa e no meio sendo equivalente à 2,17 kg. As saídas consideradas, resíduos e emissões para tratamento, foram 6,03 m³ de efluente.

Tabela 4 – Dados para ACV – Eletroflotação com eletrodos de ferro.

Processos	Quantidade e	Detalhes para ACV (Biblioteca <i>SimaPro7.3.2</i>)*	Detalhes para ACV (Base de dados)**
Efluente	6.400 L	Unidade Funcional	-----
Consumo de energia	8,96 kWh	<i>Electricity, high voltage, production BR, at grid/BR U</i>	<i>EcolInvent unit processes</i>
Entrada materiais	2,17 kg	<i>Cast iron, at plant/RER U</i>	<i>EcolInvent unit processes</i>
Efluente processado	6,03 m ^{3***}	<i>Treatment, sewage, to wastewater treatment, class 3/CH U</i>	<i>EcolInvent unit processes</i>

* Nome da biblioteca e da base de dados mantidos em inglês conforme software *SimaPro*; ** Nome do banco de dados mantido em inglês conforme software *SimaPro*; *** Resíduo líquido com massa específica próxima à 1,0 kg m⁻³.

No processo de separação da biomassa por meio de eletroflotação com eletrodos de alumínio se considerou os mesmos equipamentos diminuindo o tempo de aplicação de corrente elétrica para 20 min, conforme Baierle *et al.* (2015).

Assim sendo os cálculos necessários para a ACV desse método se apresentam da seguinte forma:

- Potência da fonte 0,36 kW x 20 minutos = 0,12 kWh.
- Consumo do agitador mecânico 2,2 kW x 20 minutos = 0,73 kWh.
- Se considerou como material de entrada a massa dos eletrodos de alumínio que ficaram depositados na biomassa e no meio sendo equivalente à 2,37 kg.
- As saídas consideradas, resíduos e emissões para tratamento, foram 6,166 m³ de efluente.

O consumo de energia do método de eletroflotação com eletrodos de alumínio foi 0,85 kWh para cada batelada. Multiplicando esse valor pelas sete bateladas previstas no estudo, o consumo total de energia seria de 5,95 kWh, como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados para ACV – Eletroflotação com eletrodos de alumínio.

Processos	Quantidade e	Detalhes para ACV (Biblioteca <i>SimaPro</i> 7.3.2)*	Detalhes para ACV (Base de dados)**
Efluente	6.400 L	Unidade Funcional	-----
Consumo de energia	5,95 kWh	<i>Electricity, high voltage, production BR, at grid/BR U</i>	<i>EcolInvent unit processes</i>
Entrada materiais	2,37 kg	<i>Anode, aluminium electrolysis/RER U</i>	<i>EcolInvent unit processes</i>
Resíduos e emissões para tratamento	6,166 m ^{3***}	<i>Treatment, sewage, to wastewater treatment, class 3/CH U</i>	<i>EcolInvent unit processes</i>

* Nome da biblioteca e da base de dados mantidos em inglês conforme software *SimaPro*; ** Nome do banco de dados mantido em inglês conforme software *SimaPro*; *** Resíduo líquido com massa específica próxima à 1,0 kg m⁻³.

Os resultados da ACV para a eletroflotação com eletrodos de ferro são apresentados no gráfico da Figura 9. A caracterização dos impactos desse método evidencia um alto impacto pelo uso da energia elétrica principalmente para a categoria “cancerígenos” com uma contribuição de 98,9%. Destacando-se também nas categorias “uso do solo”, com 58,26%, “mudanças climáticas” 25,83% e “orgânicos inaláveis” 20,26%. O efluente a ser tratado impactou em todas as categorias, especialmente em “minerais”, “acidificação/eutrofização”, “camada de ozônio”, “radiação” e “ecotoxicidade”. O ferro consumido no processo só não causou impactos para a categoria “cancerígenos” como mostram as Figuras 9 e 10.

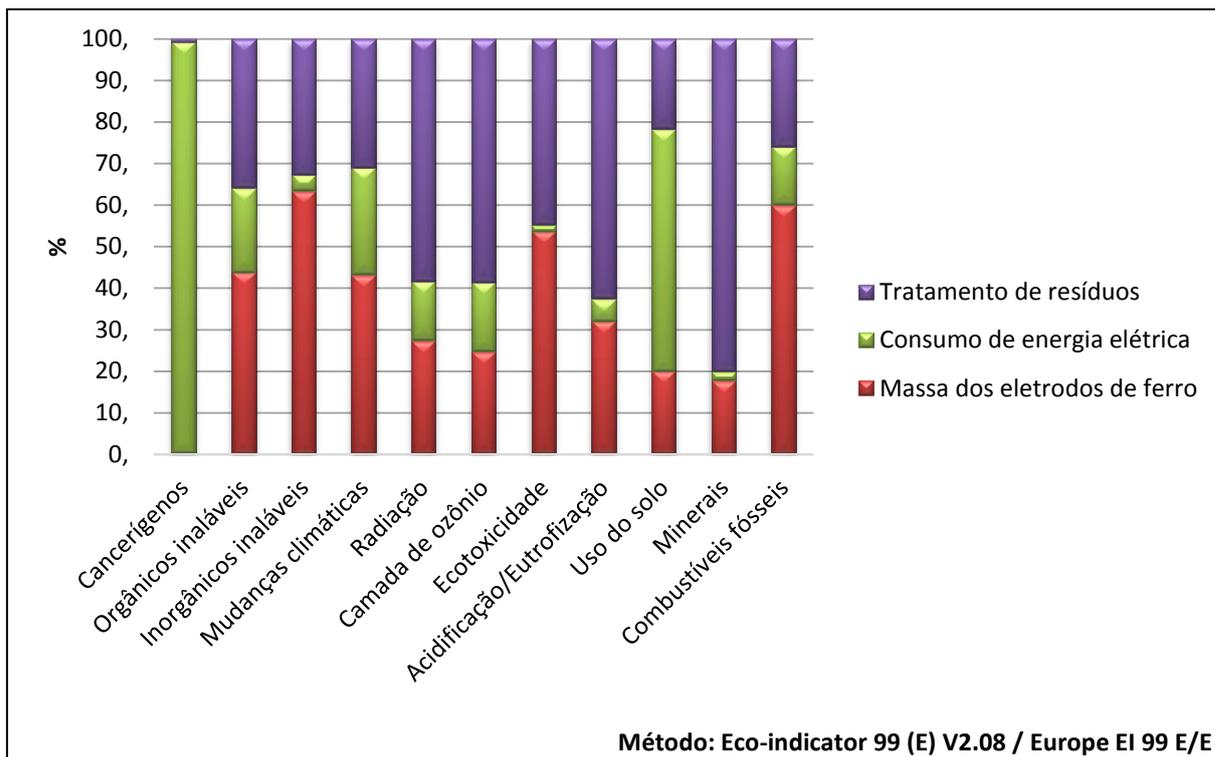


Figura 9 - Caracterização dos impactos ambientais no processo de eletroflotação com eletrodos de ferro.

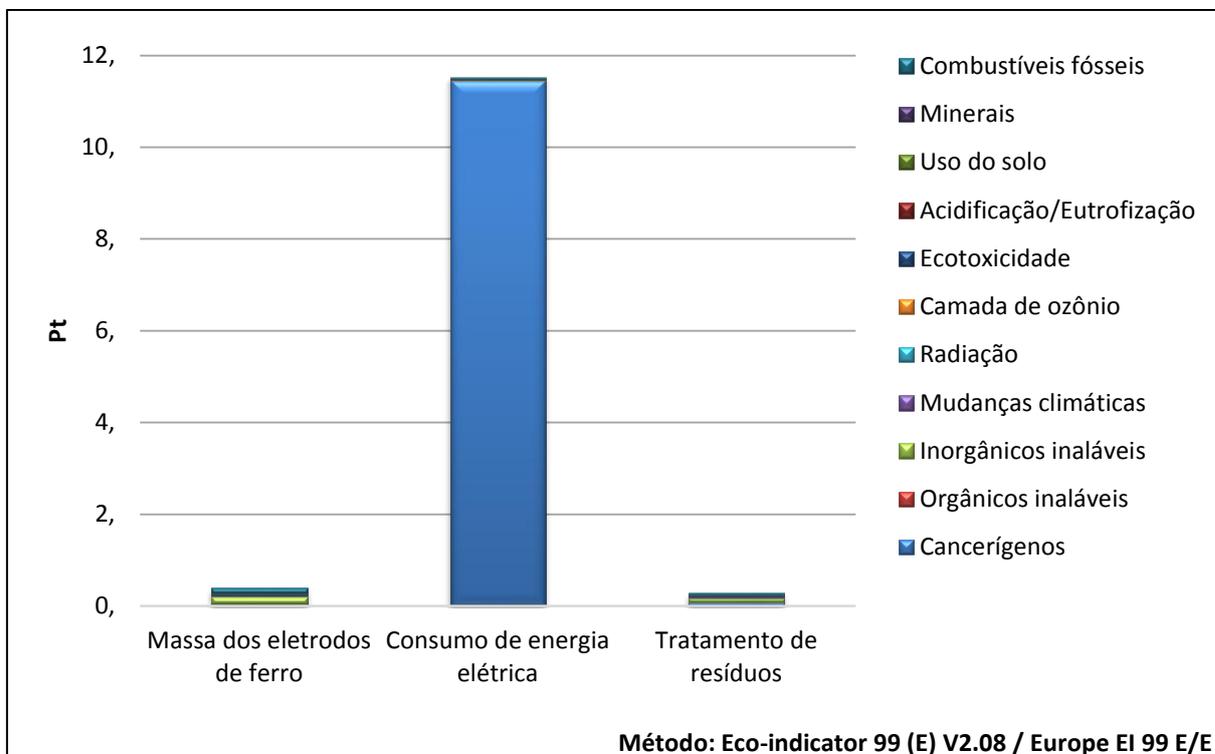


Figura 10 - Pontuação única para as categorias de impacto avaliadas na eletroflotação com eletrodos de ferro.

Com o uso do eletrodo de alumínio a caracterização dos impactos no processo de separação da biomassa por eletroflotação está representada no gráfico da Figura 11. O consumo de energia elétrica causou o mesmo efeito observado para o emprego do eletrodo de ferro. Observa-se também impactos na categoria “uso do solo” com 35,41% e em “mudanças climáticas” com 21,42% de contribuição. Da mesma forma, o consumo do eletrodo de alumínio não causa impacto na categoria “cancerígenos” como pode ser observado nas Figuras 11 e 12. O tratamento do efluente resultante do processo impactou em todas as categorias, sendo de maior impacto para “minerais”, “ecotoxicidade”, “radiação”, “acidificação/eutrofização” e “inorgânicos inaláveis”.

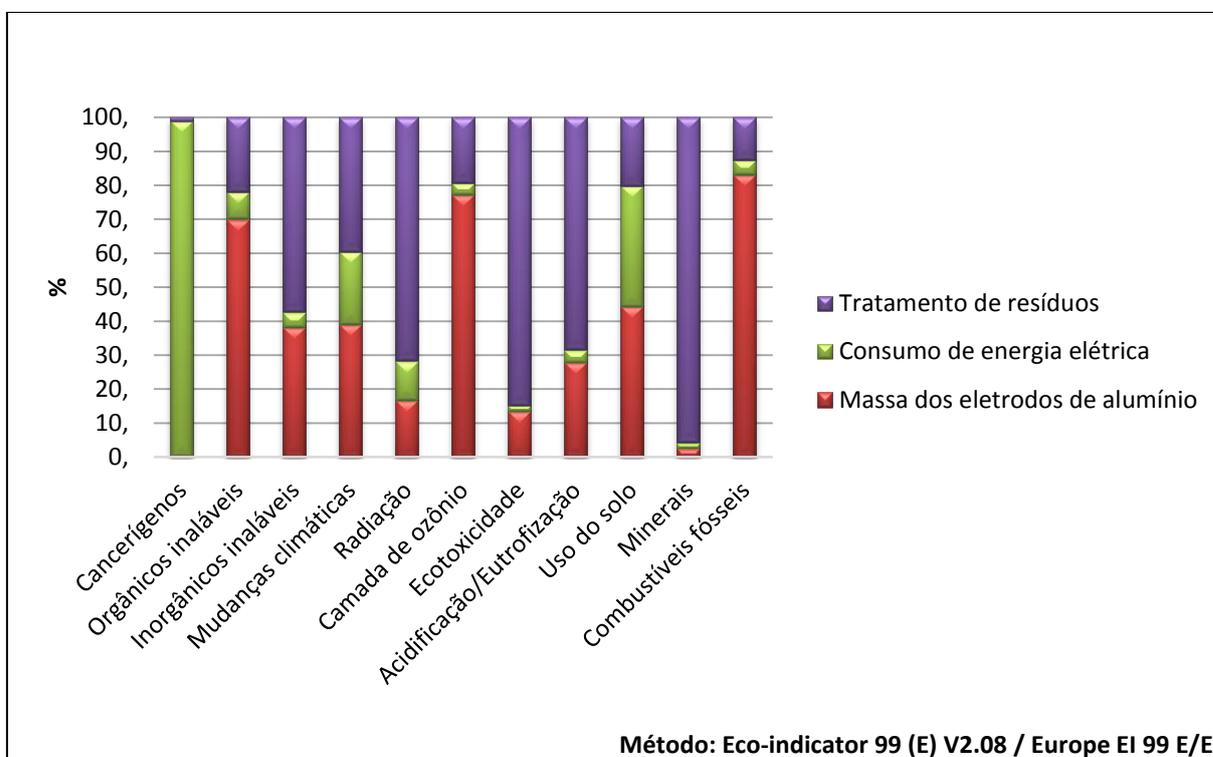


Figura 11 - Caracterização dos impactos ambientais no processo de eletroflotação com eletrodos de alumínio.

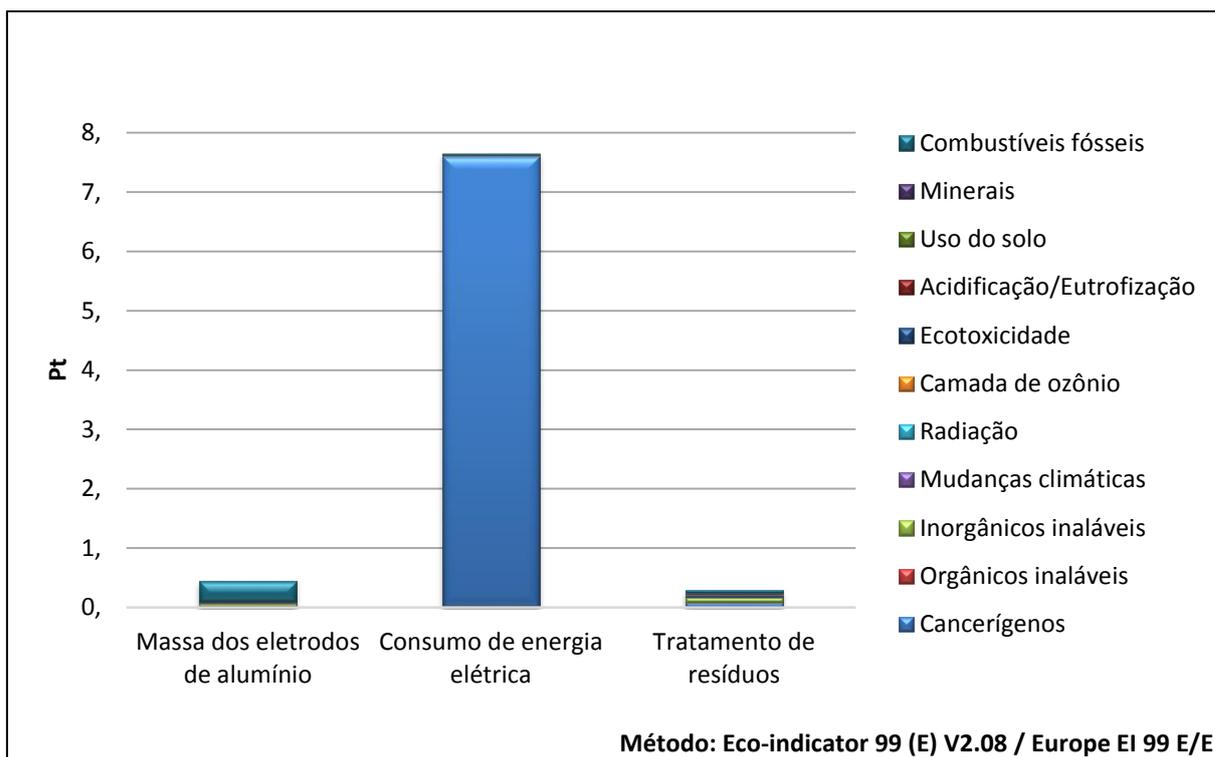


Figura 12 - Pontuação única para as categorias de impacto avaliadas na eletroflotação com eletrodos de alumínio.

Os resultados relacionados as categorias de danos são observados no gráfico da Figura 13 para emprego de eletrodo de ferro e na Figura 14 para emprego de eletrodo de alumínio. Para ambos, na categoria “danos à saúde humana” praticamente apenas o uso de energia elétrica é responsável pelo impacto em quase 100%. O consumo da massa dos eletrodos tem grande contribuição nas categorias “danos aos recursos naturais” e “danos à qualidade dos ecossistemas”. O tratamento do efluente contribui nas categorias “danos à qualidade do ecossistema” e “danos aos recursos naturais”.

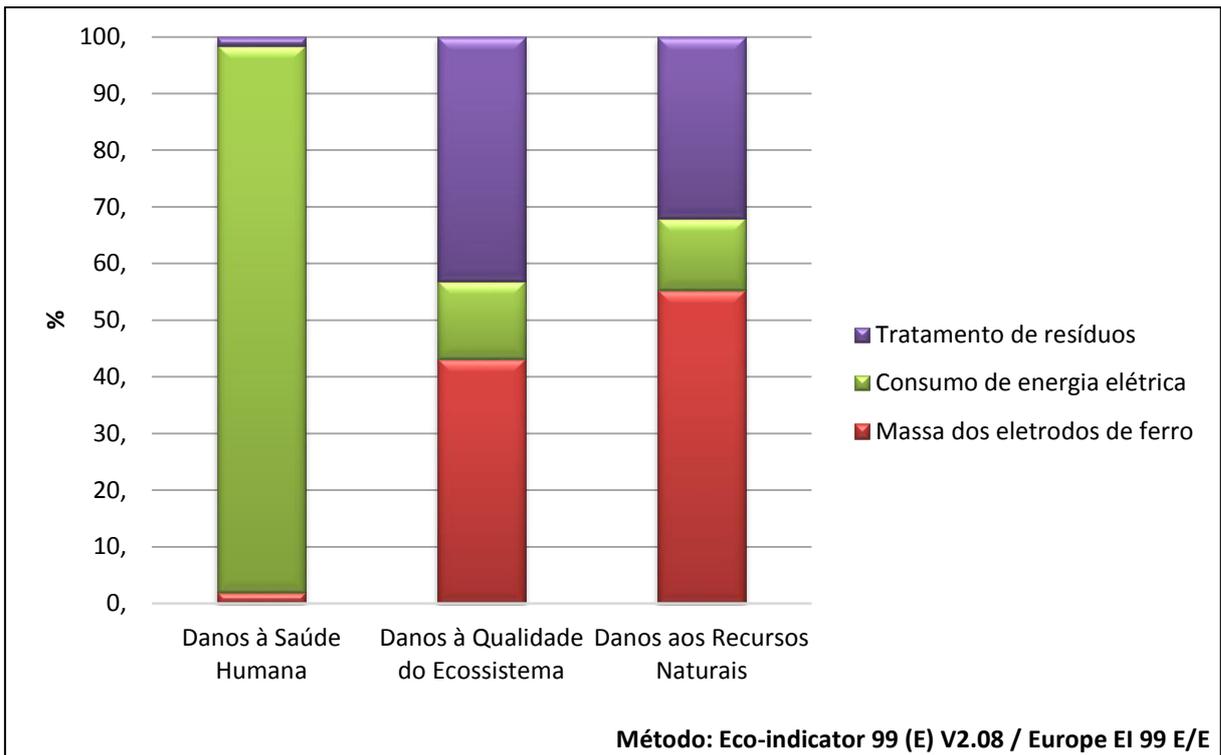


Figura 13 - Categoria de danos para o processo de eletroflotação com eletrodos de ferro.

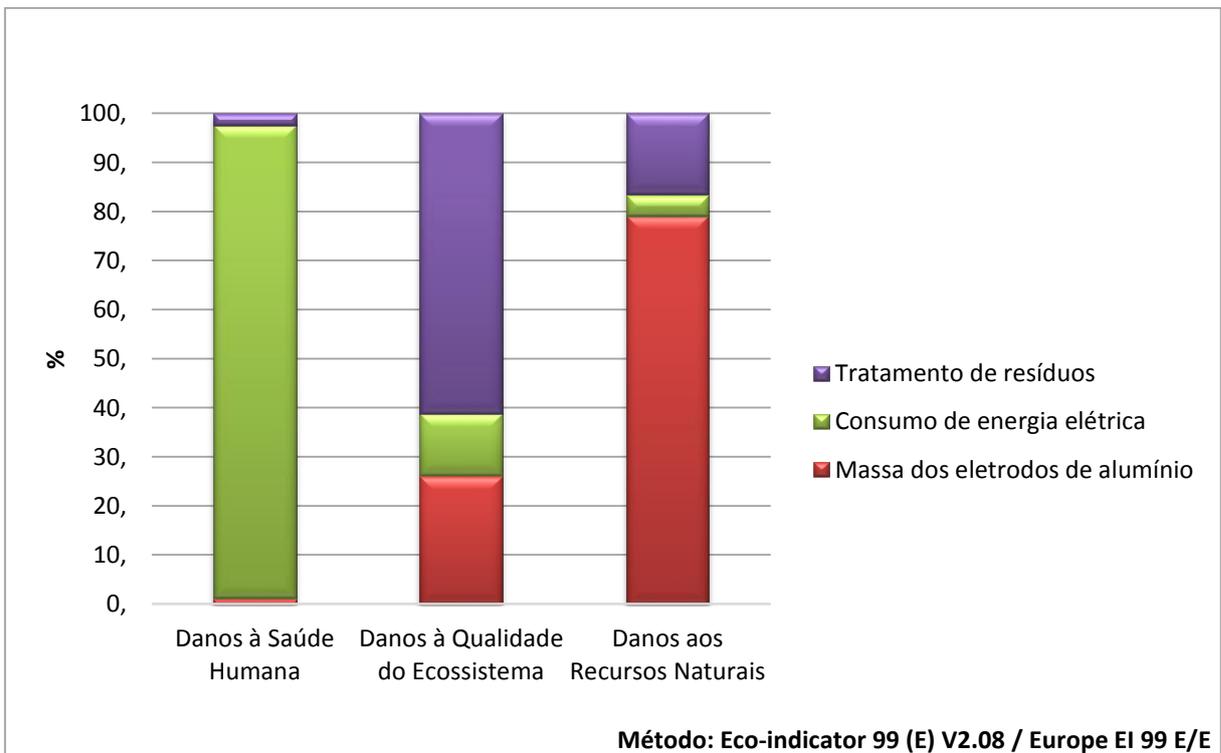


Figura 14 - Categoria de danos para o processo de eletroflotação com eletrodos de alumínio.

5.2.3 Centrifugação

Para o processo de centrifugação foi selecionada a centrífuga de fluxo contínuo da marca Evodos, modelo Evodos 10. Seu rendimento é de 750 Lh⁻¹, potência de 4 HP e consumo máximo de 3 kWh. O volume a ser centrifugado pelo equipamento seria os 6.400 L; considerando o rendimento da centrífuga seriam necessárias 8,5 h para centrifugar o volume referido. Para a limpeza do equipamento se considerou o uso de 50 L de água e hipoclorito de sódio em solução a 15%. Se considerou como “fluxo final de resíduo” e “emissão para a água” a massa de hipoclorito e de água utilizada na lavagem do equipamento 51,3 kg. As informações referentes a essa etapa estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados para ACV – Centrifugação.

Processos	Quantidade	Detalhes para ACV (Biblioteca <i>SimaPro</i> 7.3.2)*	Detalhes para ACV (Base de dados)**
Efluente	6.400 L	Unidade Funcional	-----
Consumo de energia	25,5 kWh	<i>Electricity, high voltage, production BR, at grid/BR U</i>	<i>EcolInvent unit processes</i>
Entrada materiais	50 kg	<i>Water, completely softned, at plant/RER U</i>	<i>EcolInvent unit processes</i>
Entrada materiais	1,3 kg	<i>Sodium hypochlorite, 15% in H₂O, at plant/RER U</i>	<i>EcolInvent unit processes</i>
Emissões para a água	51,3 kg	Resíduo de lavagem do equipamento	Resíduo tratado
Fluxo Final de resíduo	51,3 kg	Resíduo de lavagem do equipamento	Resíduo a ser tratado
Resíduos e emissões para tratamento	0,0513 m ^{3***}	<i>Treatment, sewage, unpolluted, to wastewater treatment, class 3/CH U</i>	<i>EcolInvent unit processes</i>

* Nome da biblioteca e da base de dados mantidos em inglês conforme software *SimaPro*; ** Nome do banco de dados mantido em inglês conforme software *SimaPro*; *** Resíduo líquido com massa específica próxima à 1,0 kg m⁻³.

Os resultados da ACV por categoria de impactos para a centrifugação estão apresentados no gráfico da Figura 15. O emprego de energia elétrica causou alto impacto em todas as categorias analisadas conforme já visualizado para os gráficos de outras etapas onde a energia elétrica foi utilizada. O único insumo utilizado nesta etapa é a solução de hipoclorito de sódio para limpeza, o qual causou impacto em 10 categorias, destacando-se “ecotoxicidade”, “minerais”, “inorgânicos inaláveis” e “radiação”. Os resultados analisados

em pontos, Figura 16, demonstram que somente os impactos relacionados ao uso de energia são visíveis no gráfico, mesmo havendo outros impactos, porém muito menores.

O uso de hipoclorito de sódio para desinfecção numa ETE com reator UASB seguida de *wetlands* construídos foi responsável pelos maiores impactos em um estudo de ACV conduzido por Lopes (2014).

Destaca-se que no uso da flotação e na eletroflotação, após a aglomeração das células, a centrifugação aumenta a eficiência de separação comparado ao uso de filtração com tecido de algodão.

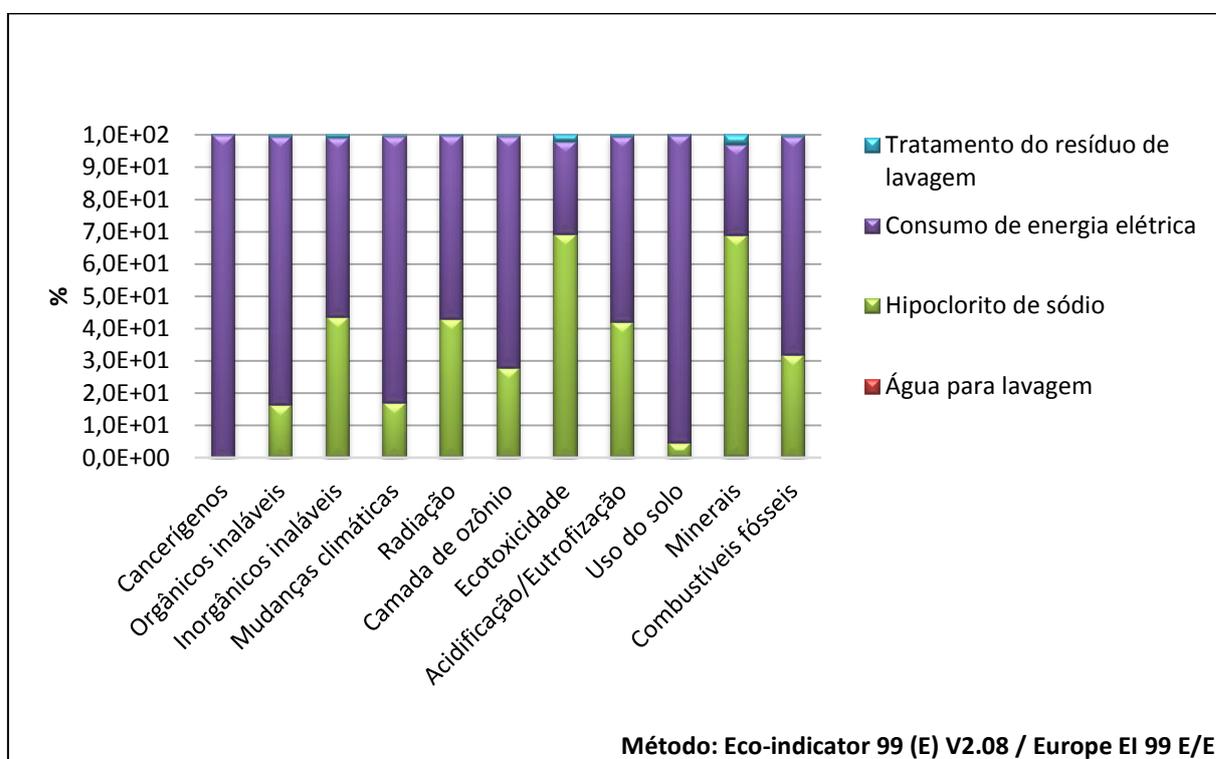


Figura 15 - Caracterização dos impactos ambientais no processo de centrifugação.

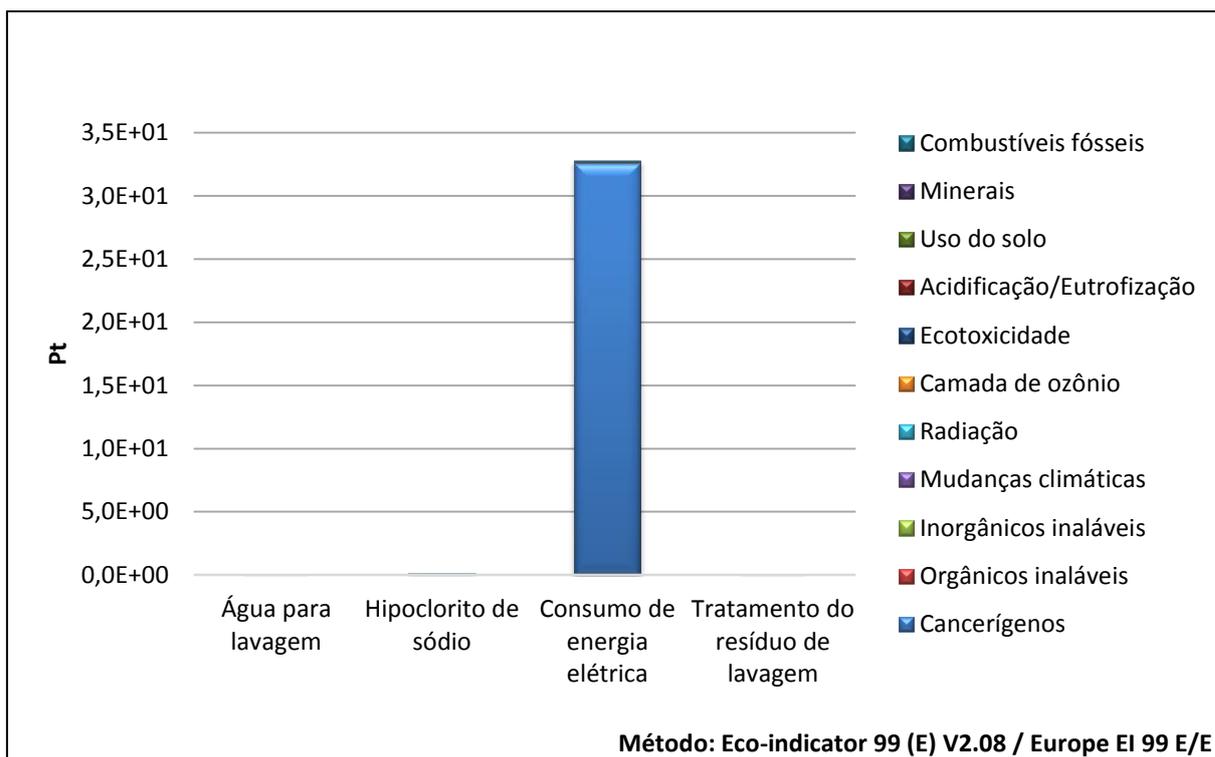


Figura 16 - Pontuação única para as categorias de impacto avaliadas na centrifugação.

5.2.4 Filtração

O processo de filtração, neste estudo, foi complementar aos métodos de floculação e eletroflotação tendo como finalidade recuperar a biomassa do meio líquido. O filtro considerado foi de algodão. Para a limpeza do mesmo se considerou 50 L de água e 1,3 kg de hipoclorito de sódio em solução à 15%. O efluente residual da lavagem do filtro (fluxo final de resíduo e emissão para a água) foi considerado resíduo e emissão para tratamento equivalente à 0,0513 m³. Os dados de entrada e saída para ACV deste método estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Detalhes para ACV – Filtração.

Processos	Quantidade	Detalhes para ACV (Biblioteca <i>SimaPro</i> 7.3.2)*	Detalhes para ACV (Base de dados)**
Efluente	6.400 L	Unidade Funcional	-----
Entrada materiais	50 kg	<i>Water, completely softned, at plant/RER U</i>	<i>EcoInvent unit processes</i>
Entrada materiais	1,3 kg	<i>Sodium hypochlorite, 15% in H₂O, at plant/RER U</i>	<i>EcoInvent unit processes</i>
Emissões para a água	51,3 kg	Resíduo de lavagem do equipamento	Resíduo tratado
Fluxo Final de resíduo	51,3 kg	Resíduo de lavagem do equipamento	Resíduo a ser tratado
Resíduos e emissões para tratamento	0,0513 m ^{3***}	<i>Treatment, sewage, unpolluted, to wastewater treatment, class 3/CH U</i>	<i>EcoInvent unit processes</i>

* Nome da biblioteca e da base de dados mantidos em inglês conforme software *SimaPro*; ** Nome do banco de dados mantido em inglês conforme software *SimaPro*; *** Resíduo líquido com massa específica próxima à 1,0 kg m⁻³.

O resultado da ACV da filtragem mostra que o principal impacto foi causado pelo uso de hipoclorito de sódio impactando próximo a 100% em todas as categorias como pode ser observado no gráfico da Figura 17. O tratamento do resíduo de lavagem causou impacto mínimo em todas as categorias. Na categoria de danos o uso de hipoclorito foi responsável por impactos à saúde humana e aos recursos naturais como mostra o gráfico da Figura 18.

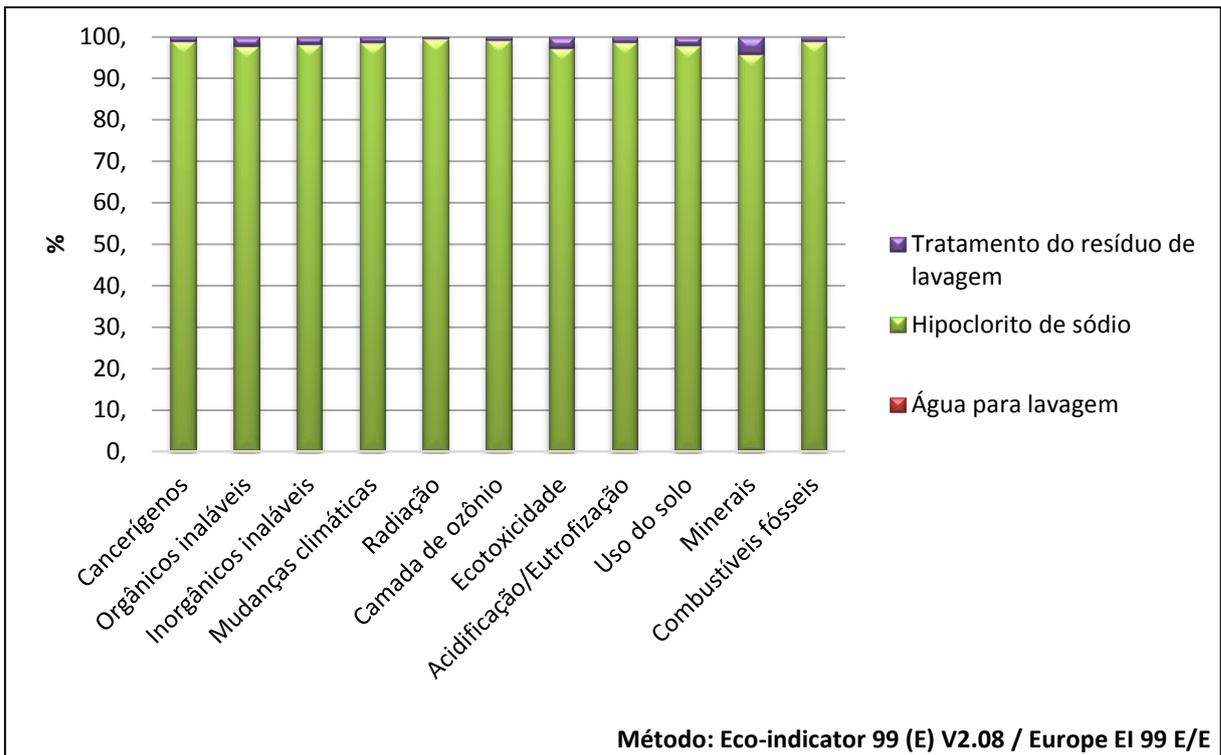


Figura 17 - Caracterização dos impactos ambientais no processo de filtração.

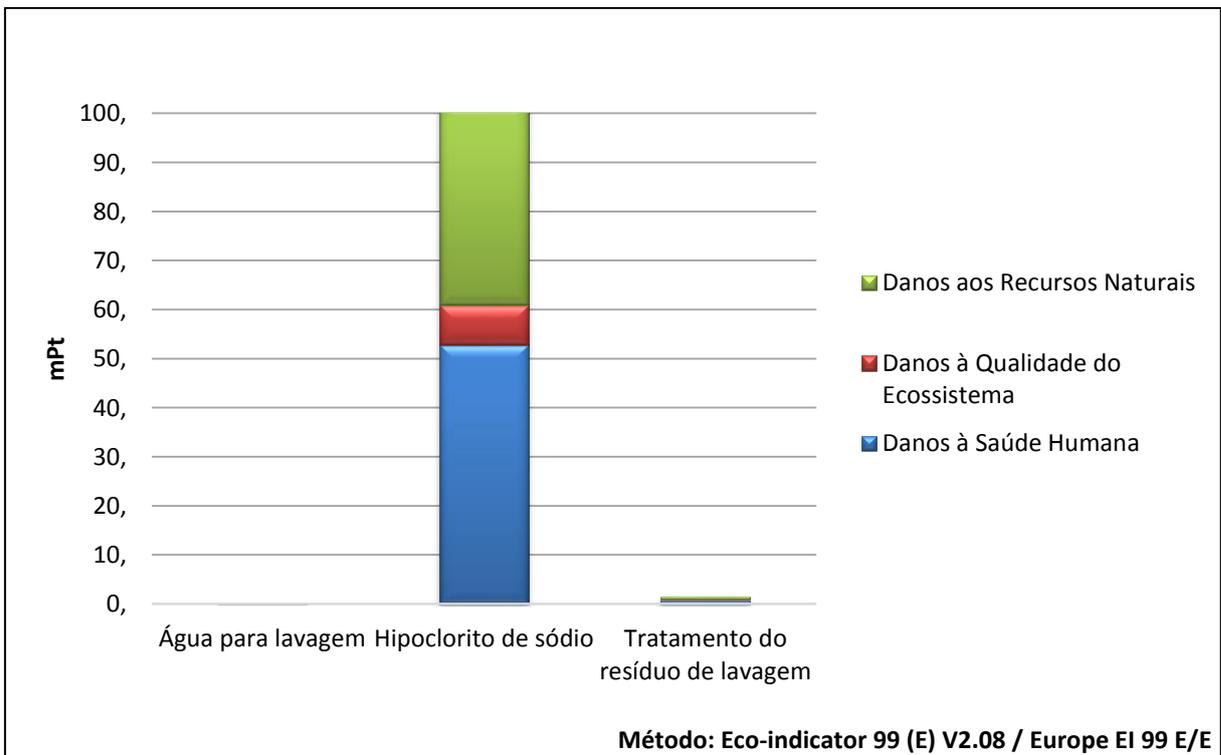


Figura 18 - Categoria de danos em pontuação única para o processo de filtração.

5.3 Secagem da biomassa

Para a etapa de secagem da biomassa foram consideradas duas alternativas: secagem ao sol e secagem em estufa.

Para a secagem em estufa foi empregado equipamento da marca Tecnal, modelo TE-394/5-MP. A estufa apresenta ventilação interna com circulação de ar no sentido horizontal. A parte inferior da estufa é aberta, o que faz com que a umidade seja emitida diretamente para a atmosfera. A potência do equipamento é de 1,1 kW. As bandejas com biomassa úmida são dispostas em prateleiras. A temperatura de secagem foi 50°C por 24 horas, totalizando 26,4 kWh. O único dado de entrada para ACV considerado neste método foi o consumo de energia elétrica.

A secagem ao sol ou em estufa é um aspecto importante a ser definido quando se refere a produção de microalgas. Ao sol não há uso de energia, no entanto, o tempo de secagem e a possibilidade de reduzir a qualidade da biomassa são grandes. Desta forma, o uso de uma estufa de secagem em bandejas, tem o impacto 100% relacionado ao uso de energia elétrica, visto na Figura 19, causando principalmente danos à saúde como mostra a Figura 20.

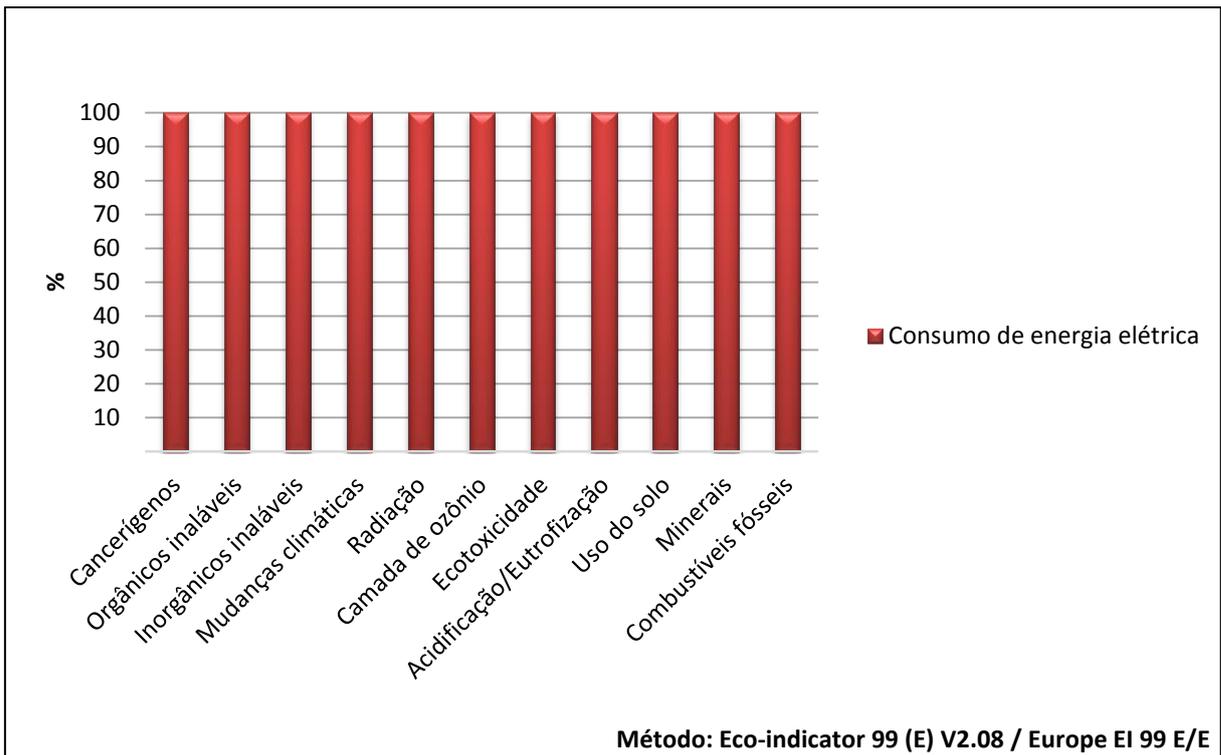


Figura 19 - Caracterização dos impactos ambientais no processo de secagem em estufa.

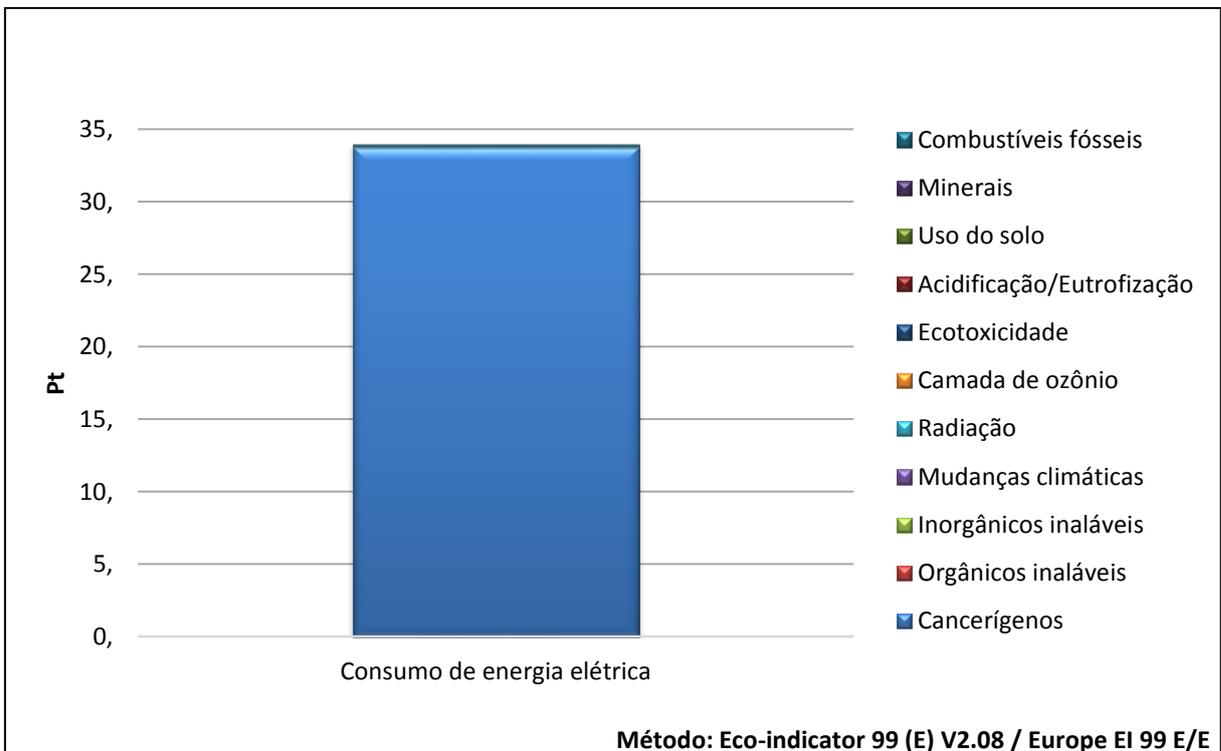


Figura 20 - Pontuação única para as categorias de impacto avaliadas na secagem em estufa.

5.4 Comparação de cenários

Considerando a avaliação dos impactos de cada etapa de produção de biomassa de microalgas em meio efluente foi possível definir mais de um cenário, que apresentam configurações de processo onde principalmente o método de separação provoca diferenças no total de pontos de impactos ambientais. O total de pontos da ACV de cada configuração está apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Pontuação dos cenários simulados.

Etapas	Métodos	Cenários (Pt)		
		1	2	3
Cultivo microalgas		461	461	461
Separação biomassa	Centrifugação	33	-----	33
	Floculação por NaOH	-----	0,29	0,29
	Filtração	-----	0,02	-----
Secagem biomassa	Secagem em estufa	34	34	34
Pontuação Total (Pt)		528	495,31	528,29

O cenário 1 compreendeu as etapas de produção de microalgas, centrifugação e secagem da biomassa em estufa. Os resultados em pontuação única para ACV desse cenário estão no gráfico da Figura 21. Fica evidente um alto impacto na categoria “cancerígenos”, especialmente na produção, devido ao emprego de energia elétrica. Em menor escala há impacto na centrifugação e na secagem em estufa, pelo mesmo motivo. O gráfico da Figura 22 mostra a caracterização dos impactos por etapa, onde igualmente se destaca a fase de produção.

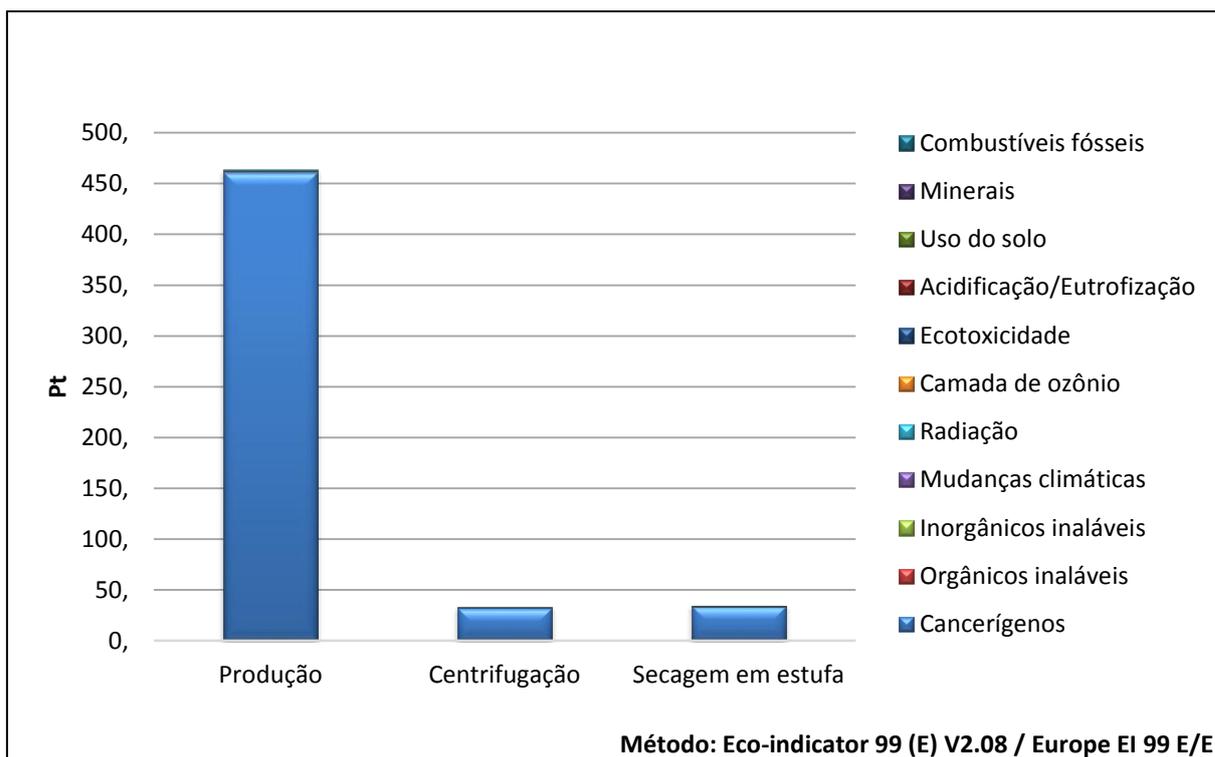


Figura 21 - Cenário 1 em pontuação única para as categorias de impacto.

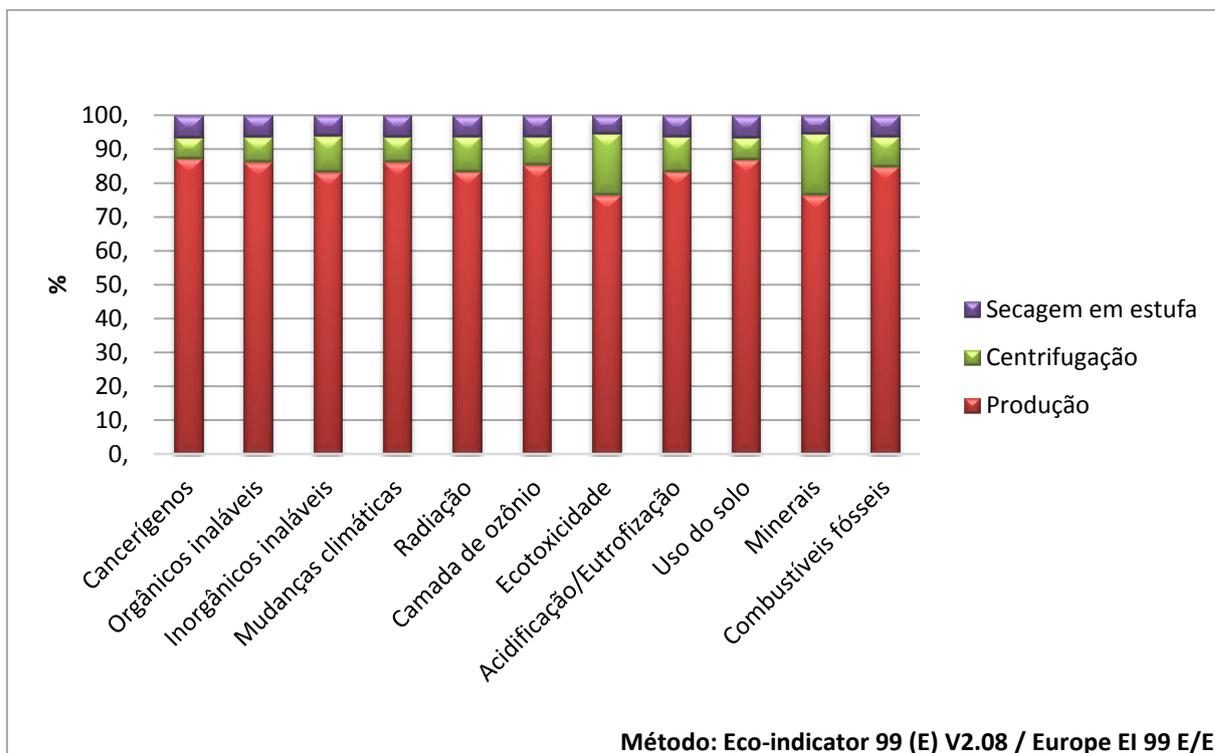


Figura 22 - Caracterização dos impactos ambientais no cenário 1.

Na análise individual para a etapa de produção as duas alternativas metodológicas, uso de *paddle wheels* ou uso de *blower*, apresentaram mesmo consumo energético e, portanto,

mesmo impacto. Entretanto, com vistas à implantação do sistema de cultivo de microalgas em estação de tratamento de efluente faz-se uma recomendação pela utilização da alternativa com *blower*, já que é possível realizar uma suplementação no meio de cultivo com CO₂, visando aumento da produtividade, sem a necessidade de adicionar equipamentos ao *raceway* para este fim, o sistema utilizaria os mesmos difusores de ar.

O cenário 2 buscou avaliar o método de separação da biomassa empregando floculação por adição de hidróxido de sódio seguida de filtração. Complementaram o cenário as etapas de produção e secagem em estufa. A filtração com filtro de algodão objetivou a recuperação da biomassa para posterior secagem.

Os resultados da análise do cenário 2 estão apresentados no gráfico da Figura 23, em pontos. O principal impacto ambiental ocorreu na categoria “cancerígenos” na etapa de produção por força do emprego de energia elétrica. Um pequeno impacto, também em “cancerígenos”, ocorreu na etapa de secagem por conta da energia elétrica. A Figura 24 apresenta a caracterização dos impactos. A produção impactou em todas as categorias, destacando-se em “cancerígenos”, “uso do solo”, “orgânicos inaláveis”, “mudanças climáticas” e “camada de ozônio”. A utilização de hidróxido de sódio apresentou um impacto considerável nas categorias “ecotoxicidade”, “minerais”, “radiação”, “inorgânicos inaláveis” e “acidificação/eutrofização”.

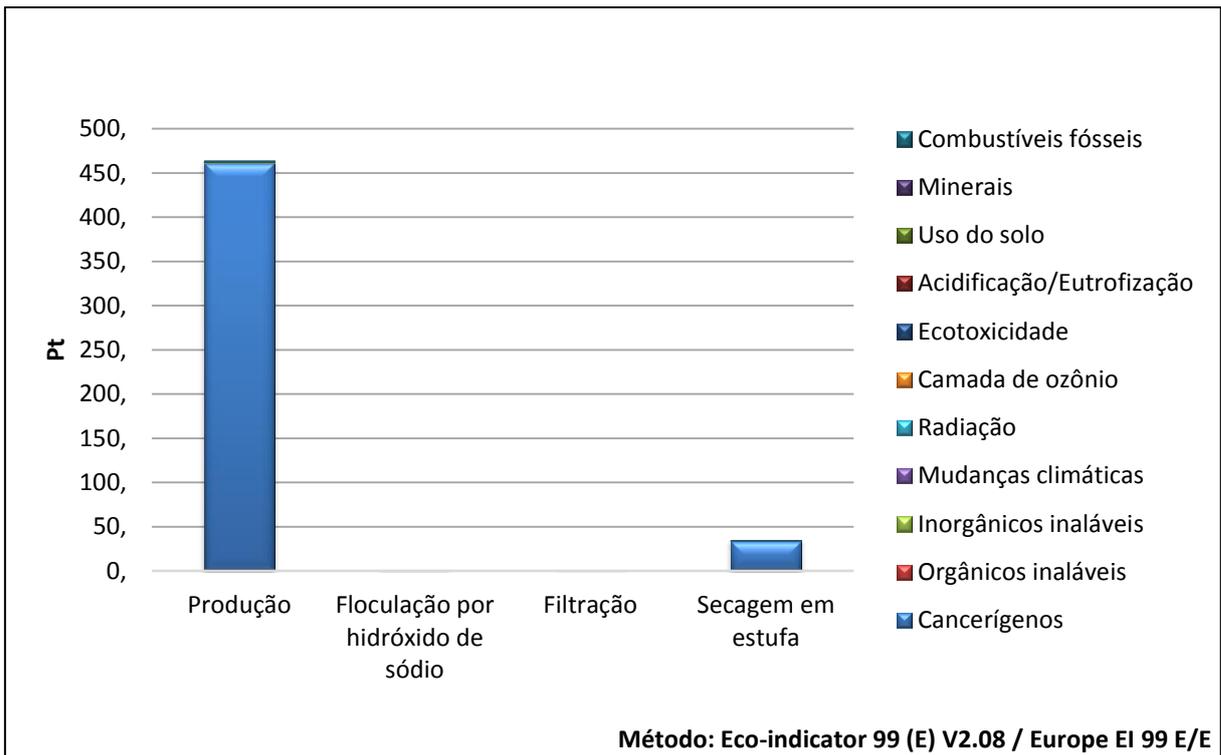


Figura 23 - Cenário 2 em pontuação única para as categorias de impacto.

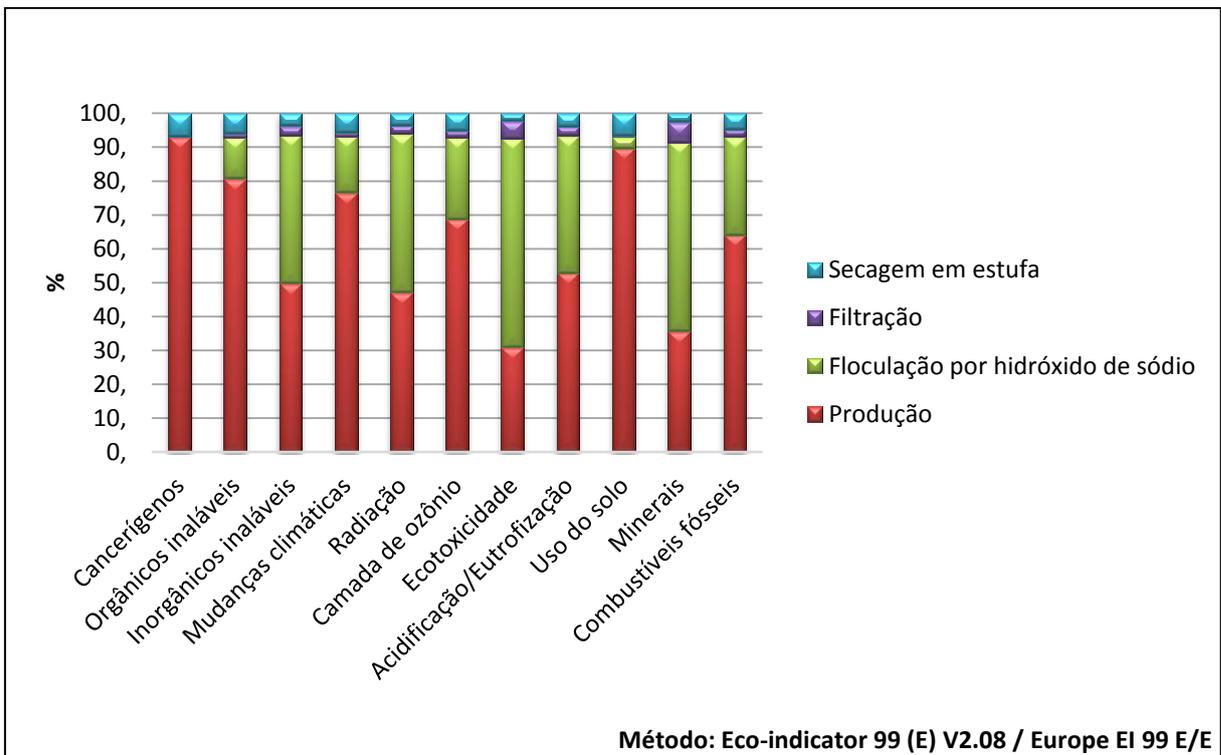


Figura 24 - Caracterização dos impactos ambientais no cenário 2.

O cenário 3 foi elaborado visando um maior emprego tecnológico buscando otimização do tempo na obtenção do bioproduto de interesse, a biomassa seca. Dessa forma

se conjugou as técnicas de floculação por hidróxido de sódio e centrifugação. A etapa de filtração foi desconsiderada em função da opção pela centrifugação.

Assim exposto, o cenário 3 foi composto pelas etapas de produção, floculação por adição de hidróxido de sódio, centrifugação e secagem em estufa. Observando os resultados apontados pela ACV para o cenário 3 no gráfico na Figura 25 (em pontuação única) percebe-se alto impacto ambiental na categoria “cancerígenos” na etapa de produção atribuída ao uso de energia elétrica. As etapas de centrifugação e secagem em estufa apresentam o mesmo tipo de impacto mas em menor escala.

A caracterização dos impactos ambientais, gráfico da Figura 26, mostra que a produção de microalgas impactou em todas as categorias, como nos cenários anteriores. Os principais impactos ocorreram em “cancerígenos”, “uso do solo”, “orgânicos inaláveis”, “mudanças climáticas”, “camada de ozônio”, “combustíveis fósseis” e “acidificação/eutrofização”. A etapa de separação da biomassa por floculação com adição de hidróxido de sódio causou impacto considerável nas categorias “ecotoxicidade”, “minerais”, “radiação” e “inorgânicos inaláveis”.

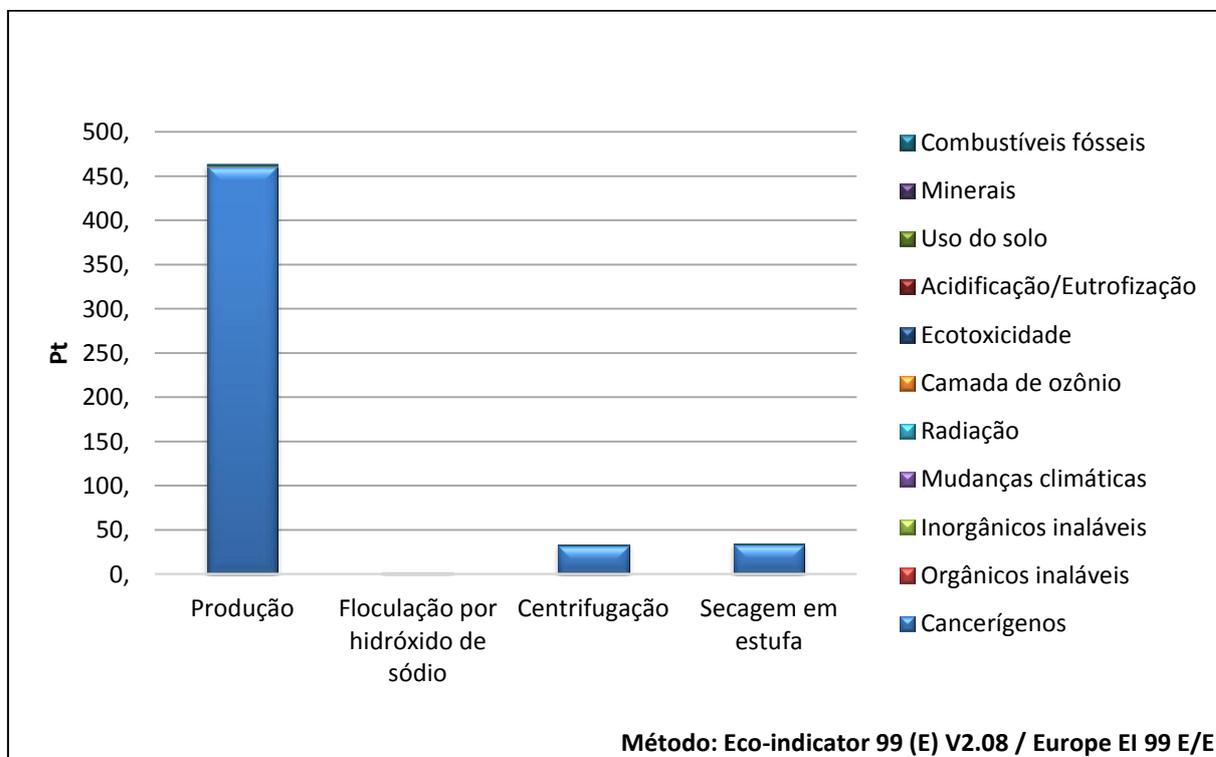


Figura 25 - Cenário 3 em pontuação única para as categorias de impacto.

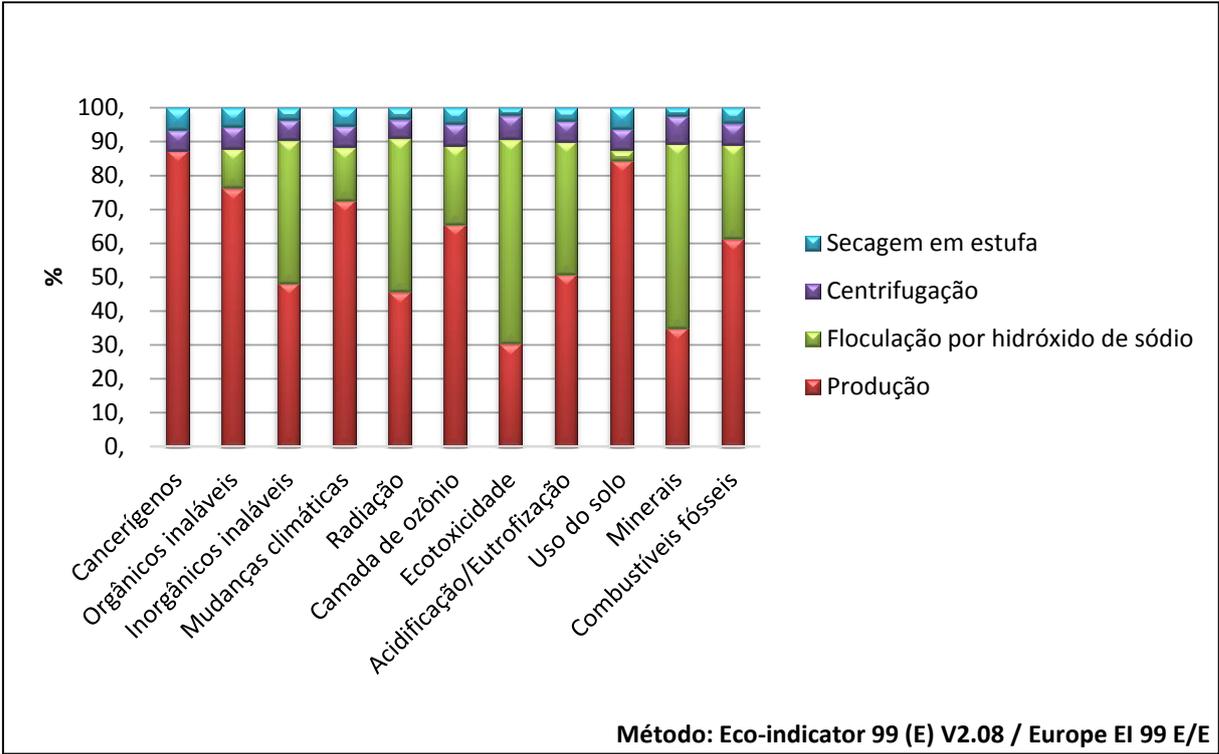


Figura 26 - Caracterização dos impactos ambientais no cenário 3.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme resultados dos testes de escala laboratorial e seleção de equipamentos para a produção de microalgas em estação de tratamento de efluente para a unidade funcional de 8.000 L foi elaborado o inventário de ciclo de vida.

De acordo com os resultados obtidos na Análise do Ciclo de Vida, baseado nos dados inventariados, a etapa que mais impactou o processo foi o cultivo de microalgas apresentando $1,36 \cdot 10^{-2}$ DALYs, equivalente à 461 pontos. O insumo que mais contribuiu nesse resultado foi a energia elétrica, principalmente na categoria “cancerígenos”, agrupada em “Danos à Saúde Humana”.

Na simulação dos cenários propostos o que apresentou os menores valores de impacto ambiental foi o cenário 2, que previa as etapas de produção de biomassa de microalga, separação com floculação por adição de hidróxido de sódio, filtração e secagem em estufa. O resultado obtido, em pontuação única, foi 495,31 Pt devido ao emprego de método que não necessita de energia elétrica na etapa de separação, visto que na produção e secagem a mesma foi utilizada apresentando os mesmos valores.

Visando otimizar a produtividade de microalgas recomenda-se a utilização da metodologia com uso de *blower* na etapa de produção, haja visto que pode ser feita suplementação de CO₂ utilizando os mesmos difusores de ar, sem necessidade de instalação de novos equipamentos. Entretanto novas pesquisas visando uma avaliação da produtividade deste sistema comparado ao método de *paddle wheel* com suplementação de CO₂ é interessante para definir o melhor caminho para o cultivo das microalgas com *raceways*.

Ainda, na etapa de cultivo se o sistema for construído em terreno em desnível não seria necessária a utilização de bomba submersa para conduzir o meio de cultivo para o tanque de separação da biomassa; assim o impacto por uso da energia elétrica poderia ser menor. Outra alternativa para a reduzir esse impacto seria avaliar a possibilidade do emprego de energia solar ou mesmo elaborar novos cenários de ACV com essa condição.

Para a etapa de eletroflotação seria interessante testar a utilização de eletrodos de aço inoxidável e verificar a impacto gerado. Dessa forma não haveria resíduos metálicos presente no efluente nem seria necessário o subsequente tratamento do mesmo.

Considerando que este estudo levantou dados para a realização de uma batelada de 8.000 L para a produção de microalgas em 10 dias é importante destacar que o sistema aqui proposto tem capacidade de atender uma demanda anual de até 288.000 L de efluente. O que poderia ser viável para o volume de efluente gerado em uma universidade.

Posto isso, o cultivo de microalgas em estação de tratamento de esgoto visando a produção de biocombustíveis é uma alternativa interessante haja vista as vantagens do sistema e a simplicidade do mesmo. Estudos de viabilidade econômica e técnica, com outras alternativas metodológicas, são importantes e enriqueceriam esse campo do conhecimento.

7 REFERÊNCIAS

AHMAD, A. L. et al. Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 584-593, 1// 2011. ISSN 1364-0321. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110003059> >.

AMARO, H. M.; MACEDO, A. C.; MALCATA, F. X. Microalgae: An alternative as sustainable source of biofuels? **Energy**, v. 44, n. 1, p. 158-166, Aug 2012. ISSN 0360-5442. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000308259300016 >.

ANEEL, A. N. D. E. E.-. **Relatório ANEEL 2013**. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Brasília, p.80. 2014

BAIERLE, F. et al. Biomass from microalgae separation by electroflotation with iron and aluminum spiral electrodes. **Chemical Engineering Journal**, v. 267, n. 0, p. 274-281, 5/1/ 2015. ISSN 1385-8947. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894715000601> >.

BICALHO, T.; RICHARD, J.; BESSOU, C. Limitations of LCA in environmental accounting for biofuels under RED. **Sustainability Accounting, Management and Policy Journal**, v. 3, n. 2, p. 218-234, 2012. Disponível em: < <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/20408021211282322> >.

BRENNAN, L.; OWENDE, P. Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, p. 557-577, 2// 2010. ISSN 1364-0321. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002408> >.

COELHO, C. **Life cycle assessment parameters adaptation for Brazilian electricity production**. 2009. (Master). Chalmers University of Technology, Goteborg.

DASSEY, A. J.; THEEGALA, C. S. Harvesting economics and strategies using centrifugation for cost effective separation of microalgae cells for biodiesel applications. **Bioresource Technology**, v. 128, p. 241-245, 1// 2013. ISSN 0960-8524. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412015635> >.

DE OLIVEIRA LOURENÇO, S. **Cultivo de microalgas marinhas: princípios e aplicações**. RiMa, 2006. ISBN 9788576561132. Disponível em: < <https://books.google.com.br/books?id=cFWnNAAACAAJ> >.

DE SOUZA SCHNEIDER, R. D. C. et al. Residual fatty and oil production in Arroio do Tigre town, Rio Grande do Sul State, aiming biodiesel production. **Acta Scientiarum-Technology**, v. 33, n. 1, p. 71-79, JAN-MAR 2011 2011.

DEMIRBAS, A. Use of algae as biofuel sources. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 12, p. 2738-2749, 12// 2010. ISSN 0196-8904. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890410002207> >.

_____. Competitive liquid biofuels from biomass. **Applied Energy**, v. 88, n. 1, p. 17-28, 1// 2011. ISSN 0306-2619. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910002850>>.

DEMIRBAS, M. F. Biofuels from algae for sustainable development. **Applied Energy**, v. 88, n. 10, p. 3473-3480, 10// 2011. ISSN 0306-2619. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261911000778>>.

FINKBEINER, M. From the 40s to the 70s—the future of LCA in the ISO 14000 family. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 1, p. 1-4, 2012. ISSN 1614-7502. Disponível em: <
<http://dx.doi.org/10.1007/s11367-012-0492-x>>.

GAO, S. et al. Effects of chloride ions on electro-coagulation-flotation process with aluminum electrodes for algae removal. **Journal of Hazardous Materials**, v. 182, n. 1–3, p. 827-834, 10/15/ 2010. ISSN 0304-3894. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389410008678>>.

GAO, S. et al. Electro-coagulation–flotation process for algae removal. **Journal of Hazardous Materials**, v. 177, n. 1–3, p. 336-343, 5/15/ 2010. ISSN 0304-3894. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389409020081>>.

GHERNAOUT, D. et al. Application of electrocoagulation in Escherichia coli culture and two surface waters. **Desalination**, v. 219, n. 1–3, p. 118-125, 1/25/ 2008. ISSN 0011-9164. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916407005681>>.

GRESSLER, P. D. et al. Cultivation of *Desmodesmus subspicatus* in a tubular photobioreactor for bioremediation and microalgae oil production. **Environmental Technology**, v. 35, n. 2, p. 209-219, Jan 17 2014. ISSN 0959-3330; 1479-487X. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000328469200011 >.

GUILLARD, R. R. L. Culture of Phytoplankton for Feeding Marine Invertebrates. In: SMITH, W. L. e CHANLEY, M. H. (Ed.). **Culture of Marine Invertebrate Animals: Proceedings — 1st Conference on Culture of Marine Invertebrate Animals Greenport**. Boston, MA: Springer US, 1975. p.29-60. ISBN 978-1-4615-8714-9.

HAMMOUDA, O.; GABER, A.; ABDELRAOUF, N. Microalgae and Wastewater Treatment. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 31, n. 3, p. 205-210, 8// 1995. ISSN 0147-6513. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651385710640>>.

HARUN, R.; DANQUAH, M. K. Influence of acid pre-treatment on microalgal biomass for bioethanol production. **Process Biochemistry**, v. 46, n. 1, p. 304-309, 1// 2011. ISSN 1359-5113. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359511310003387>>.

ISO-14040. **Environmental management—life cycle assessment—principles and framework**. Geneva, Switzerland: International Organisation for Standardization. 2006.

ISO-14041. **Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines.** Geneva, Switzerland: International Organisation for Standardization . 2006.

ISO-14042. **Environmental management-life cycle assessment-life cycle impact assessment.** Geneva, Switzerland: International Organisation for Standardization. 2000.

ISO-14043. **Environmental management—life cycle impact assessment—life cycle impact assessment.** Geneva, Switzerland: International Organisation for Standardization. 2000.

ISO-14044. **Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines.** Geneva, Switzerland: International Organisation for Standardization. 2006.

KAEWCHAROENSOMBAT, U.; PROMMETTA, K.; SRINOPHAKUN, T. Life cycle assessment of biodiesel production from jatropha. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 42, n. 3, p. 454-462, 5// 2011. ISSN 1876-1070. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876107010001793>>.

KHAN, S. A. et al. Prospects of biodiesel production from microalgae in India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 9, p. 2361-2372, 12// 2009. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109000860>>.

KLÖPFER, W.; CURRAN, M. A. **Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment.** Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. 261.

KUMAR, K. et al. Development of suitable photobioreactors for CO₂ sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 8, p. 4945-4953, 4// 2011. ISSN 0960-8524. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852411001234>>.

LI, Y. C. et al. Integration of algae cultivation as biodiesel production feedstock with municipal wastewater treatment: Strains screening and significance evaluation of environmental factors. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 23, p. 10861-10867, Dec 2011. ISSN 0960-8524. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000297490500012 >.

LOPES, T. A. D. S. **Avaliação do ciclo de vida de uma ETE composta por reator UASB seguido de wetlands construídos.** 2014. 136 (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA.

MIAO, X.; WU, Q. Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 6, p. 841-846, 4// 2006. ISSN 0960-8524. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852405002191>>.

MONTEIRO, M. F. **Avaliação do ciclo de vida do fertilizante superfosfato simples**. 2008. 177 (Mestrado). Departamento de engenharia ambiental - DEA, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA.

MUÑOZ, R.; GUIEYSSE, B. Algal–bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review. **Water Research**, v. 40, n. 15, p. 2799-2815, 8// 2006. ISSN 0043-1354. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135406003605> >.

PACHECO, M. M. et al. Microalgae: Cultivation techniques and wastewater phycoremediation. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 50, n. 6, p. 585-601, 2015/05/12 2015. ISSN 1093-4529. Disponível em: < <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10934529.2015.994951> >. Acesso em: 2015/04/20.

PASSELL, H. et al. Algae biodiesel life cycle assessment using current commercial data. **Journal of Environmental Management**, v. 129, p. 103-111, 11/15/ 2013. ISSN 0301-4797. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479713004647> >.

PAWELZIK, P. et al. Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials – Reviewing methodologies and deriving recommendations. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 73, p. 211-228, 4// 2013. ISSN 0921-3449. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344913000359> >.

PEREZ-GARCIA, O. et al. Heterotrophic cultures of microalgae: Metabolism and potential products. **Water Research**, v. 45, n. 1, p. 11-36, 1// 2011. ISSN 0043-1354. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135410006019> >.

PIERAGOSTINI, C.; MUSSATI, M. C.; AGUIRRE, P. On process optimization considering LCA methodology. **J Environ Manage**, v. 96, n. 1, p. 43-54, Apr 15 2012. ISSN 1095-8630 (Electronic) 0301-4797 (Linking). Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22208397> >.

PITTMAN, J. K.; DEAN, A. P.; OSUNDEKO, O. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. **Bioresour Technol**, v. 102, n. 1, p. 17-25, Jan 2011. ISSN 1873-2976 (Electronic) 0960-8524 (Linking). Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20594826> >.

PITTMAN, J. K.; DEAN, A. P.; OSUNDEKO, O. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. **Bioresour Technology**, v. 102, n. 1, p. 17-25, 1// 2011. ISSN 0960-8524. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852410010163> >.

POELMAN, E.; DE PAUW, N.; JEURISSEN, B. Potential of electrolytic flocculation for recovery of microalgae. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 19, n. 1, p. 1-10, 1// 1997. ISSN 0921-3449. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344996011561> >.

RAHMANI, A. R. et al. Continuous thickening of activated sludge by electro-flotation. **Separation and Purification Technology**, v. 107, n. 0, p. 166-171, 4/2/ 2013. ISSN 1383-5866. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586613000373> >.

RICHMOND, A. **Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology**. 1. Oxford: Blackwell Science, 2004. 588 ISBN 978-0-632-05953-9.

SCHNEIDER, R. C. S. et al. Potential Production of Biofuel from Microalgae Biomass Produced in Wastewater. In: FANG, Z. (Ed.). "**Biodiesel - Feedstocks, Production and Applications**, 2012. ISBN 978-953-51-0910-5,.

SCHOEPP, N. G. et al. System and method for research-scale outdoor production of microalgae and cyanobacteria. **Bioresource Technology**, v. 166, p. 273-281, 8// 2014. ISSN 0960-8524. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852414007056> >.

SINGH, J.; GU, S. Commercialization potential of microalgae for biofuels production. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 2596-2610, Dec 2010. ISSN 1364-0321. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000282853500009

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110001619> >.

SINGH, J.; GU, S. Commercialization potential of microalgae for biofuels production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 2596-2610, 12// 2010. ISSN 1364-0321. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110001619> >.

SOARES, D. *Avaliação do crescimento celular e da produtividade de lipídeos de microalgas marinhas em diferentes regimes de cultivo*. 2010. 107 (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Ciências: Bioquímica – Mestrado e Doutorado, Universidade Federal do Paraná

SU, Y.; MENNERICH, A.; URBAN, B. Coupled nutrient removal and biomass production with mixed algal culture: Impact of biotic and abiotic factors. **Bioresource Technology**, v. 118, n. 0, p. 469-476, 8// 2012. ISSN 0960-8524. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412008462> >.

VARANDA, M. G.; PINTO, G.; MARTINS, F. Life cycle analysis of biodiesel production. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 5, p. 1087-1094, 5// 2011. ISSN 0378-3820. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037838201100021X> >.

WESCHLER, M. K. et al. Process energy comparison for the production and harvesting of algal biomass as a biofuel feedstock. **Bioresource Technology**, v. 153, p. 108-115, 2// 2014. ISSN 0960-8524. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852413017124> >.

WU, J. et al. Evaluation of several flocculants for flocculating microalgae. **Bioresource Technology**, v. 197, p. 495-501, 12// 2015. ISSN 0960-8524. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852415012006> >.