

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DE UM SISTEMA PRODUTIVO CIRCULAR: um estudo de caso da cadeia produtiva do EPS

THALES EDUARDO TAVARES DANTAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

FLAVIA BITTENCOURT MORE
UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

JÚLIA FRANÇA ALVARENGA
UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DE UM SISTEMA PRODUTIVO CIRCULAR: um estudo de caso da cadeia produtiva do EPS

1. INTRODUÇÃO

A Economia Circular (EC) é um dos principais conceitos que emergiu dos debates relacionados a recursos e resíduos (BLOMSMA; BRENNAN, 2017) e vem despertando crescente interesse por parte da comunidade científica (KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018), governos (MCDOWALL *et al.*, 2017) e setor privado (DE OLIVEIRA; M. LUNA; CAMPOS, 2019). De forma prática, a EC visa transformar resíduos em recursos, ao defender a extração mínima de matérias-primas e a maximização do ciclo de vida de materiais por meio da promoção da reutilização, reciclagem, e recuperação (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016). Deschamps *et al.* (2018) argumentam que o design de produtos que sejam facilmente reparáveis e recuperáveis é parte fundamental da EC, de forma que estes possam ser utilizados como materiais primários para os processos produtivos da mesma indústria (reciclagem em ciclo fechado) ou de outra indústria (reciclagem em ciclo aberto). Neste contexto, plásticos em geral vêm sendo forte alvo de políticas públicas e estudos voltados a EC (HUYSMAN *et al.*, 2017).

Dentre a vasta gama de produtos plásticos, se encontra o poliestireno expandido (EPS). O EPS é um termoplástico não tóxico, inerte, com estabilidade dimensional, e baixo custo (SARMIENTO *et al.*, 2016). Devido a sua aplicação flexível, os setores da construção, eletrônica e embalagens fazem uso extensivo do EPS em seus sistemas de produto (LITHNER; LARSSON; DAVE, 2011). Por outro lado, devido à sua flexibilidade, baixo custo e dificuldades de logística reversa e reciclagem, os produtos de EPS são frequentemente descartados após seu primeiro uso, gerando quantidades significativas de resíduos, e culminando, possivelmente, em danos ambientais provenientes de seu descarte incorreto (DE OLIVEIRA; M. LUNA; CAMPOS, 2019). Por conseguinte, cadeias produtivas baseadas na reciclagem do EPS demonstram forte alinhamento com a EC, uma vez que promovem a maximização do ciclo de vida do material (CHEN *et al.*, 2019), diminuindo a pressão ambiental causada por sua cadeia produtiva altamente impactante (DESCHAMPS *et al.*, 2018; VARGAS-GONZALEZ *et al.*, 2019).

Este trabalho objetiva, por meio de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), analisar os impactos ambientais do rodapé de EPS reciclado, produzido por uma empresa do sul do Brasil. A matéria-prima do sistema produtivo (EPS pós-uso primário) é proveniente de cadeias produtivas a montante do sistema analisado. Este material é então introduzido no setor da construção civil, caracterizando um sistema de reciclagem em ciclo aberto. O sistema produtivo aqui analisado apresenta forte aderência aos princípios da EC, uma vez que contribui para a maximização do uso de recursos já inseridos no mercado e para a diminuição da extração de recursos naturais por meio da reciclagem.

2. PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVO

A avaliação quantitativa de sistemas produtivos alinhados à economia circular, ou “sistemas circulares” tem sido um ponto de destaque científico nos últimos anos. Diversas abordagens têm sido criadas para a avaliação destes sistemas. Entretanto, metodologias já bem consolidadas, como a ACV, são bem equipadas para a avaliação destes sistemas. A ACV, em especial, por ser baseada no pensamento de ciclo de vida, se apresenta como uma técnica com estrutura metodológica robusta e adequada para a identificação dos benefícios e *trade-offs* envolvidos no fechamento de *loops*, característico de sistemas circulares.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é avaliar os potenciais impactos ambientais de um sistema de reciclagem em ciclo aberto de EPS, de uma cadeia produtiva baseada do sul do

Brasil. Por meio desta análise é possível melhor compreender os benefícios e *trade-offs* deste sistema produtivo circular.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo pretende fornecer embasamento teórico para a melhor compreensão desta pesquisa. Com base nos objetivos propostos, a revisão bibliográfica foi dividida em duas partes: i) Economia Circular e ii) Avaliação do Ciclo de Vida.

3.1 Economia Circular

A EC é um tema que vem ganhando espaço em meios acadêmicos e governamentais. Ela descreve a ruptura dos paradigmas econômicos, apresentando uma alternativa melhor para o atual modelo de desenvolvimento econômico, baseado na lógica linear “extrair, produzir e descartar” (NESS, 2008). O conceito de EC é de grande interesse para diferentes setores, uma vez que é visto como a operacionalização para a implementação do desenvolvimento sustentável pelo mercado (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016).

Por mais que a EC tenha recentemente se tornado um tópico emergente, a sua disseminação é dificultada devido à grande quantidade de abordagens diferentes do campo (KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018). McDowall *et al.* (2017) argumentam que a EC apresenta um escopo amplo, que oferece potencial para a flexibilidade interpretativa, isto é, pode ser entendida ou aplicada de forma distinta em diferentes contextos, a fim de acomodar uma ampla gama de interesses políticos.

Kirchherr *et al.* (2017) caracterizam EC através do estudo de 114 definições utilizadas em meios acadêmicos e institucionais. Esses autores conceituam a EC como um sistema econômico que substitui o conceito de 'fim-de-vida' pela redução, reutilização, reciclagem, e recuperação de materiais nos processos de produção, distribuição e consumo. A EC opera nos níveis micro (produtos, empresas, consumidores), meso (eco industrial, parques industriais) e macro (cidades, regiões, nações), com o objetivo de alcançar o desenvolvimento sustentável. Devido a sua abordagem multifacetária, que leva em conta os principais processos relacionados à EC, seus diferentes níveis de operação, e a relação entre este novo modelo econômico e o desenvolvimento sustentável, o presente estudo utiliza a definição apresentada por Kirchherr *et al.* (2017) como base conceitual para a EC.

A EC passa atualmente por um período de validação tanto no meio acadêmico, quanto referente à sua operacionalização no âmbito industrial e comercial. Sua implementação prática ainda apresenta progresso limitado (KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018; KIRCHHERR *et al.*, 2018). Uma importante ferramenta para o alinhamento conceitual e fomento do tema foi a publicação da norma BSI 8001 – *Framework for Implementing the Principles of the Circular Economy in Organizations* (BSI, 2017), que tem como objetivo guiar organizações de diferentes tamanhos e setores na transição para modelos circulares. Nota-se que a publicação desta norma é um marco no que tange à disseminação do conceito de EC, uma vez que é a primeira normatização referente ao tema.

Parte do processo de validação da EC se dá devido à necessidade encontrada em definir indicadores quantitativos relacionados à EC (ELIA; GNONI; TORNESE, 2017; HAAS *et al.*, 2015). Diversos autores têm estudado a relação entre metodologias já bem consolidadas no âmbito de avaliação de impactos ambientais como alternativas para a quantificação do impacto e eficiência de práticas circulares (ELIA; GNONI; TORNESE, 2017; KHARRAZI *et al.*, 2014; SAIDANI *et al.*, 2019). Dentre as principais metodologias levantadas, se destaca a ACV, utilizada neste estudo para a avaliação de sistema produtivo circular.

3.2 Avaliação do Ciclo de Vida

A crescente conscientização sobre a importância da proteção ambiental e dos possíveis impactos associados a produtos manufaturados e consumidos tem aumentado o interesse no desenvolvimento de métodos para melhor compreender e diminuir estes impactos. Uma das técnicas desenvolvidas com este propósito é a ACV (ISO, 2006a). A ACV é uma técnica importante para avaliar recursos, energia, e a degradação ambiental que resulta de tomadas de decisão relacionadas a materiais e produtos (BROWN; BURANAKARN, 2003). Diversos autores apontam que a ACV tem se mostrado vital para o desenvolvimento sustentável de forma mais concreta, a nível de produto, em que os caminhos apontados são geralmente aqueles considerados com menores impactos ambientais ou aqueles que sugerem mudanças para a redução desses impactos (ALVARENGA; PRUDÊNCIO DA SILVA; SOARES, 2012; CHERUBINI *et al.*, 2015).

Entretanto, para melhor entendimento da ACV, é necessário, primeiramente, o entendimento dos termos “Ciclo de Vida” e “Sistema de Produto”. A norma ISO 14044 (ISO, 2006b) abrange ambas as definições, conceituando “Ciclo de Vida” como “estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final.” Já o termo “Sistema de Produto” é definido como “conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de produto, desempenhando uma ou mais funções definidas e que modela o ciclo de vida de um produto”.

A ACV é uma metodologia de avaliação de impacto de abordagem *downstream*, isto é, objetiva analisar os impactos das emissões e processos cascata gerados pelas atividades do sistema de produto estudado com foco no sistema de produto e suas consequências. Dessa forma, a ACV é uma das principais técnicas utilizadas na tomada de decisão quanto aos impactos ambientais potenciais em escala local (ULGIATI; RAUGEI; BARGIGLI, 2006).

No que tange à EC, a ACV é avaliada como uma abordagem adequada para quantificar os benefícios ambientais, a eficiência material, e as estratégias desse novo modelo econômico, uma vez que ambos os temas partilham uma base conceitual fundamentada sobre o Pensamento do Ciclo de Vida (SAIDANI *et al.*, 2019; WALKER *et al.*, 2018).

A norma ISO 14040 (ISO, 2006a) discorre sobre a estrutura metodológica da ACV, dividida em quatro fases interligadas: (i) Definição de Objetivo e Escopo; (ii) Análise de Inventário; (iii) Avaliação de Impactos, e (iv) Interpretação. A sequência e interação entre tais fases são ilustradas na Figura 1.

Figura 1 - Etapas de uma ACV



Fonte: adaptado de ISO 14040 (2006a).

A primeira fase, Definição de Objetivo e Escopo, consiste na definição da razão principal para a condução do estudo, sua abrangência e limites, a unidade funcional (UF), a metodologia de avaliação de impactos ambientais a ser abordada, e os procedimentos considerados necessários. Aplicar corretamente a UF de uma ACV é a chave para se desenvolver um estudo sem ambiguidades, principalmente em estudos comparativos, que os sistemas devem ser comparados de acordo com a mesma UF (SETAC, 1993). Já a Fronteira do Sistema é definida como “a interface entre um sistema de produto e o meio ambiente ou outros sistemas de produto.” (ISO, 2006a), ou “conjunto de critérios que especificam quais processos elementares fazem parte de um sistema de produto” (ISO, 2006b). Após o devido estabelecimento da UF, da Fronteira do Sistema, e dos processos a serem estudados, a condução da ACV segue para a fase da construção do Inventário de Ciclo de Vida (ICV).

O ICV consiste no processo de coleta e quantificação dos dados de todas as entradas (energia, matéria-prima, etc.) e saídas (emissões, resíduos, coprodutos, etc.) pertinentes de um sistema de produto. O processo de condução de um inventário é iterativo. Tais dados são coletados de forma direta, analisando as entradas e saídas de matérias de um processo produtivo *in loco*, caracterizando dados primários, ou também por meio de bases de dados, que apresentam dados secundários baseados em medições feitas por terceiros.

Depois de realizado o ICV, a próxima etapa da ACV consiste na Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV). Esta fase é dirigida à avaliação da significância de impactos ambientais potenciais usando dados coletados no ICV. Em geral, a AICV envolve a associação de dados de inventário com impactos ambientais específicos e a tentativa de compreendê-los, convertendo-os em categorias de impacto ambiental (BAUMANN; TILLMAN, 2004). A partir dos resultados do AICV é possível avaliar os gargalos ambientais do sistema de produto e apresentar possíveis recomendações aos tomadores de decisão.

A última fase da ACV é denominada de Interpretação do Ciclo de Vida. Nesta etapa três principais elementos devem ser destacados: primeiro, a identificação das questões significativas com base nos resultados das fases de ICV e AICV; segundo, a avaliação do estudo de ACV considerando elementos opcionais da AICV, como a análise de sensibilidade e consistência dos dados; e, por último, a formulação de conclusões e limitações sobre o sistema estudado (ISO, 2006b). Nota-se que as constatações desta interpretação podem tomar a forma de conclusões e recomendações para os tomadores de decisão, de forma consistente com o objetivo e o escopo do estudo (ISO, 2006a). A fase de Interpretação se relaciona diretamente com as outras três etapas da ACV, o que reflete a necessidade de constante interpretação e análise dos dados e processos analisados, sendo que, caso necessário, esta etapa possibilita a alteração de escopo, objetivos e processos analisados.

4. METODOLOGIA

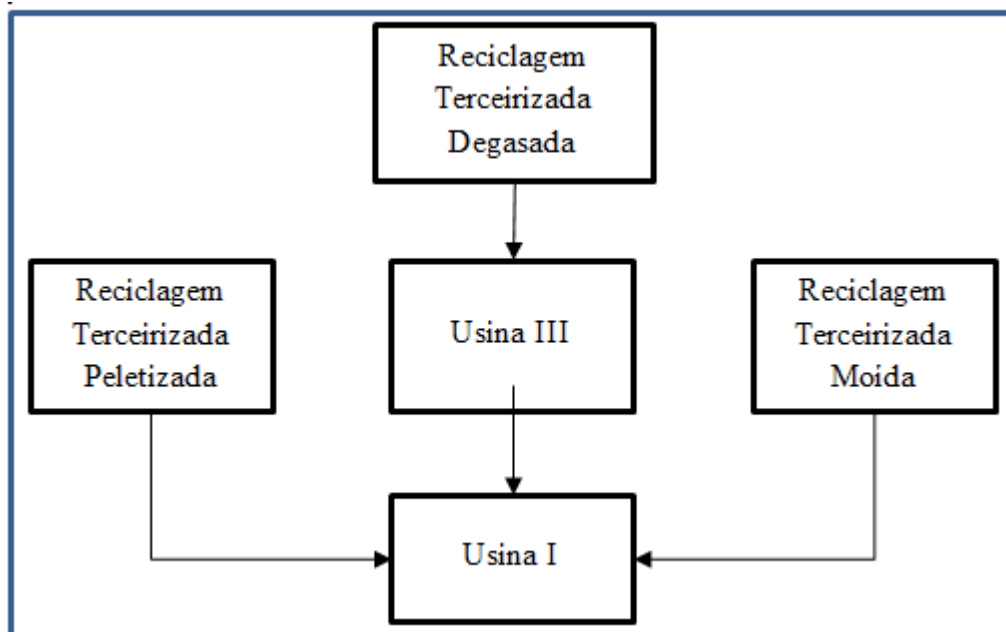
Para o estudo de ciclo de vida foram definidas uma unidade funcional (UF), fronteiras do sistema e categorias de impacto utilizadas na avaliação dos impactos do sistema de produto. A UF determinada é a produção de 1000kg de rodapé.

As categorias de impacto selecionadas foram: Aquecimento Global, Depleção de Recursos Fósseis, Eutrofização de Água Doce, Acidificação Terrestre e Toxicidade Humana Carcinogênica. Para delimitar a escolha destas categorias de impacto foi feita uma pesquisa bibliométrica nas bases de dados Springerlink, Scopus, Web of Science e ScienceDirect a fim de analisar as categorias de impacto mais utilizadas por pesquisadores brasileiros. As palavras-chave utilizadas foram combinações entre “life cycle assessment*”, “life cycle inventory*”, “life cycle impact assessment*”, “LCA”, “LCI”, “LCIA”, “Brasil” e “Brazil”. Selecionaram-se os artigos por título e palavras-chave. Esta pesquisa bibliométrica demonstrou que as categorias de impacto mais utilizadas por pesquisadores e praticantes da ACV no Brasil são: aquecimento global, toxicidade humana, acidificação terrestre, depleção de recursos fósseis, e

eutrofização de águas doces. Adicionalmente, devido ao produto final do sistema estudado ser derivado de petróleo, selecionou-se a categoria de impacto “não renováveis, fóssil”, derivada do método CED.

A fronteira do sistema de produto engloba duas usinas da empresa em questão, denominadas como U-III e U-I, e três empresas de reciclagem a montante, aqui nomeadas como Reciclagem Terceirizada Degasada, Reciclagem Terceirizada Moído e Reciclagem Terceirizada Peletizada. Nota-se que a produção real do rodapé de EPS reciclado ocorre na U-I, sendo que a massa de EPS acondicionada é enviada a esta fase do sistema de produto. A Figura 2 apresenta as fronteiras do sistema de produto.

Figura 2 - Fronteiras do Sistema.



A apresentação dos resultados da ACV do rodapé de EPS corresponde à AICV e à interpretação dos seus resultados. Foi possível a realização da avaliação de impacto ambiental do sistema por meio do software *openLCA* 1.9. As emissões e os respectivos potenciais impactos do sistema foram calculados perante as categorias de impacto descritas acima. Foram levantados os impactos ambientais dos dois cenários pré-estabelecidos – produção do rodapé de EPS reciclado (Cenário 1) e produção do rodapé de EPS virgem (Cenário 2).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os impactos ambientais da produção de uma tonelada de rodapés condizente com os Cenários 1 e 2 são apresentados pela Tabela 1.

Tabela 1 - Impactos ambientais da produção de 1 tonelada de rodapés de EPS.

Categoria de Impacto	Unidade	Cenário 1	Cenário 2
Aquecimento global	kg CO ₂ eq.	3,17E+03	5,20E+03
Depleção de Recursos Fósseis	kg Oil eq.	1,35E+03	2,34E+03
Toxicidade Humana Carcinogênica	kg 1,4-DCB eq.	7,65E+01	1,09E+02
Acidificação Terrestre	kg SO ₂ eq.	1,21E+01	1,39E+01
Eutrofização de Água Doce	kg P eq.	7,54E-01	4,80E-01
CED, não renováveis, fóssil	MJ	6,62E+04	1,07E+05

O Cenário 2, que corresponde à produção de uma tonelada de rodapés a partir do EPS virgem, apresenta pior desempenho ambiental em todas as categorias de impacto, exceto a categoria Eutrofização de Água Doce. Com o intuito de melhor explorar o comportamento de cada cenário ante as categorias de impacto, foram elaborados os gráficos presentes nas Figuras 3 e 4. A Figura 3 apresenta os resultados percentuais das categorias de impacto Aquecimento Global, Depleção de Recursos Fósseis, e Toxicidade Humana Carcinogênica. Na sequência são discutidos os resultados encontrados para estas três categorias.

Em relação à categoria Aquecimento Global, a produção do rodapé a partir do EPS virgem se mostrou cerca de 40% mais impactante do que a reciclagem em ciclo aberto. Aproximadamente 75% do impacto gerado pelo Cenário 2 provém da produção primária do EPS, que apresenta emissão de 3921,64kg CO_{2eq}. Este impacto está prioritariamente relacionado às emissões oriundas da extração do petróleo e de sua transformação em poliestireno por meio de processos industriais. O rodapé de EPS reciclado apresenta menor potencial de aquecimento global, o que denota melhor desempenho ambiental com relação a esta categoria. O aspecto ambiental mais impactante para o Cenário 1 é a energia elétrica, que emite 2121,41kg CO_{2eq}, e corresponde a 67% do impacto voltado ao aquecimento global. As emissões que caracterizam este resultado são referentes às emissões indiretas do setor elétrico.

Ao se analisar a categoria de impacto Depleção de Recursos Fósseis, nota-se um comportamento semelhante ao apresentado pelos resultados da categoria anterior. O Cenário 1 é 42% menos impactante que o Cenário 2. Cerca de 84% do impacto gerado pelo Cenário 2 corresponde à produção do EPS virgem. O consumo elétrico e o papelão utilizado na embalagem dos rodapés contribuem de forma semelhante em ambos os cenários. Entretanto, devido à rede logística necessária para o funcionamento do Cenário 1, este apresenta maiores impactos ambientais provindos do transporte e consumo energético. Mesmo dependente de toda a estrutura logística inerente ao Cenário 1, percebe-se que a produção de rodapés a partir de EPS virgem ainda é mais impactante, uma vez que tem ligação direta com a cadeia produtiva do petróleo.

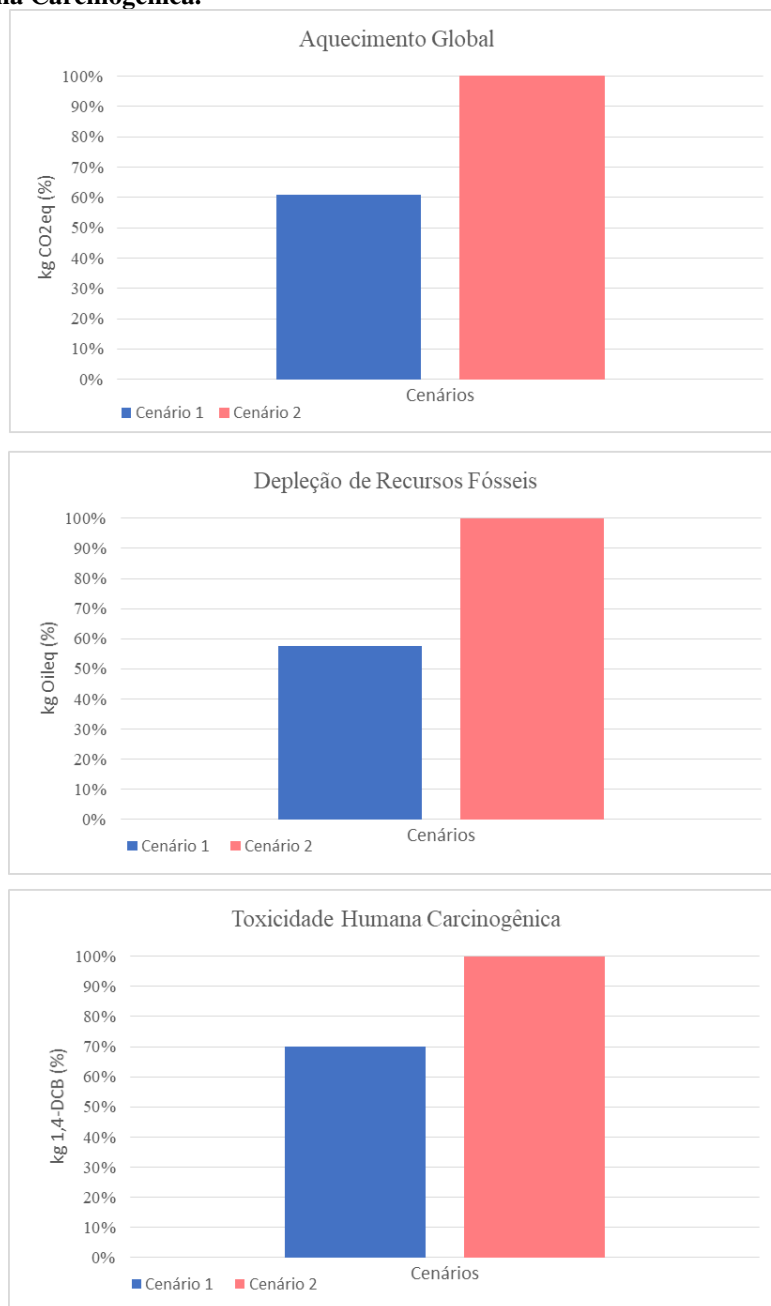
No tocante à Toxicidade Humana Carcinogênica, a produção de rodapés a partir de EPS virgem também fez com que o Cenário 2 apresentasse pior desempenho ambiental, sendo que cerca de 80% do impacto correspondente a esta categoria provém da produção primária de EPS. O Cenário 1 é 30% menos impactante do que a opção anterior, sendo que a eletricidade devido às emissões indiretas atreladas ao setor continua sendo o fator de maior influência, e, por sua vez, duas vezes mais impactante que o consumo energético do Cenário 2. A maior parte do impacto ambiental correspondente à produção do rodapé a partir de material reciclado é dividida entre os vários insumos necessários para este cenário. Já na opção concorrente, a soma dos impactos da produção de EPS e eletricidade traduzem quase a totalidade do impacto ambiental total desta categoria.

A Figura 4 retrata os gráficos correspondentes aos resultados percentuais encontrados para as categorias de impacto Eutrofização de Água Doce, Acidificação Terrestre, e Demanda Acumulada de Energia (CED) – Não Renovável, Fóssil. Os resultados destas categorias e os fatores mais decisivos para esta avaliação são discutidos abaixo.

A categoria Eutrofização de Água Doce é a única dentre as categorias avaliadas nesta pesquisa em que o rodapé de EPS virgem apresentou melhor resultado que o Cenário 1, sendo 36% mais nocivo que o segundo cenário analisado. As emissões indiretas derivadas da produção de energia elétrica são o principal fator impactante em ambos os cenários. Entretanto, devido a sua extensa cadeia produtiva composta por cinco fases, o Cenário 1 tem

maior consumo energético, traduzido em maior potencial impactante para esta categoria. Os outros itens que contribuem para o impacto nesta categoria se repetem para ambos os cenários

Figura 3 – Resultados das categorias de impacto Aquecimento Global, Depleção de Recursos Fósseis e Toxicidade Humana Carcinogênica.

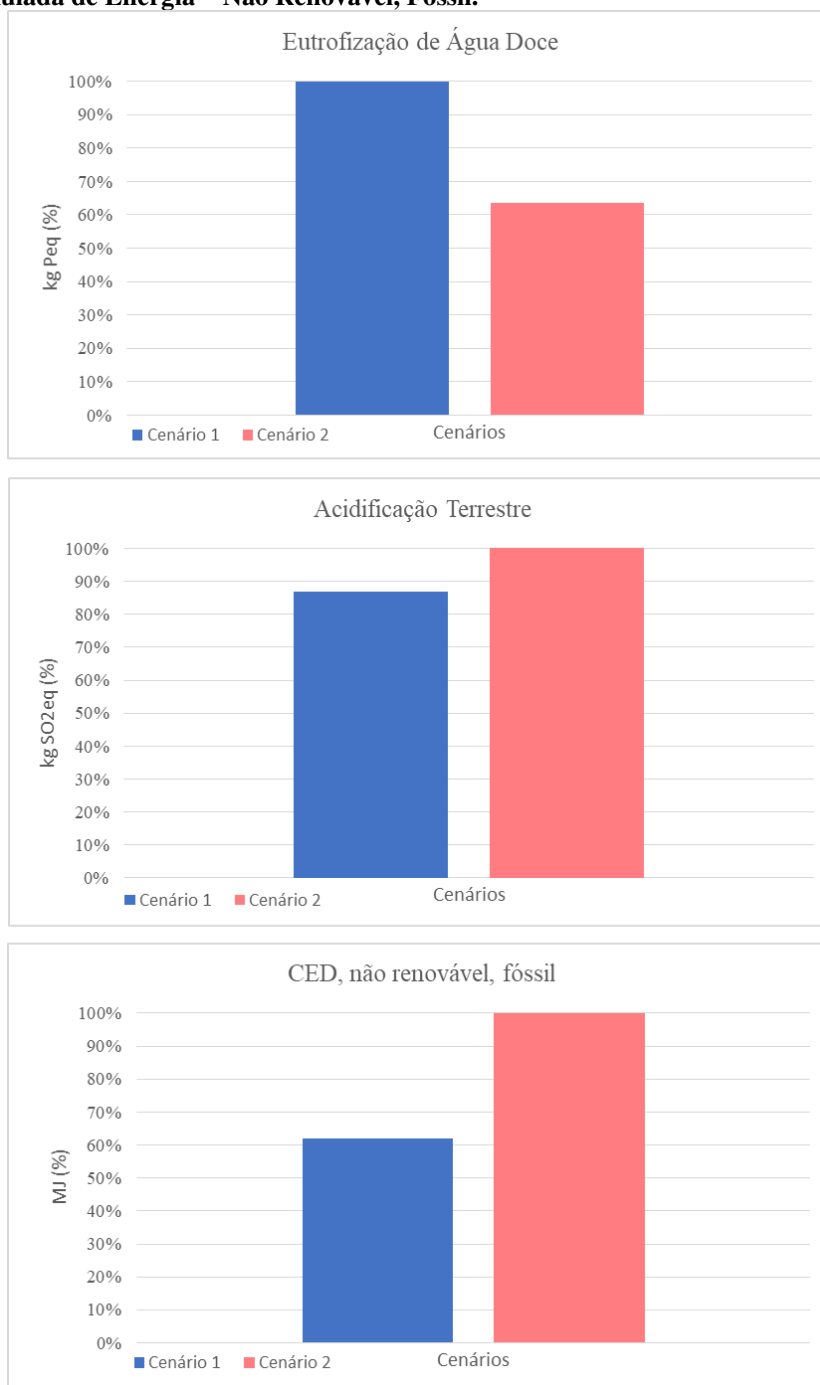


(papelão, tinta, aditivos, etc.), com exceção do EPS presente no Cenário 2, sendo este o segundo fator mais impactante após a eletricidade.

A Acidificação Terrestre é a categoria de impacto em que os resultados dos dois cenários mais se aproximaram. O Cenário 1 é 13% menos impactante que o Cenário 2. Os maiores contribuintes do Cenário 1 são a eletricidade, GLP e transporte. Situação similar foi encontrada por Chen *et al.* (2019) na ACV de tratamentos de fim de vida de plástico. Os resultados constatados pelos autores também apresentam esta categoria como a menos impactada pelos sistemas de tratamento de plástico, tendo a maior parte de seu impacto derivado das emissões indiretas do consumo de energia elétrica. Já para o Cenário 2 são o

EPS, eletricidade e papelão. A carga ambiental relacionada ao consumo de energia elétrica é duas vezes maior no Cenário 1 do que no Cenário 2. Entretanto, a produção de EPS é responsável por cerca de 70% do impacto ambiental correspondente ao Cenário 2. Dessa

Figura 4 - Resultados das categorias de impacto Eutrofização de Água Doce, Acidificação Terrestre e Demanda Acumulada de Energia – Não Renovável, Fóssil.



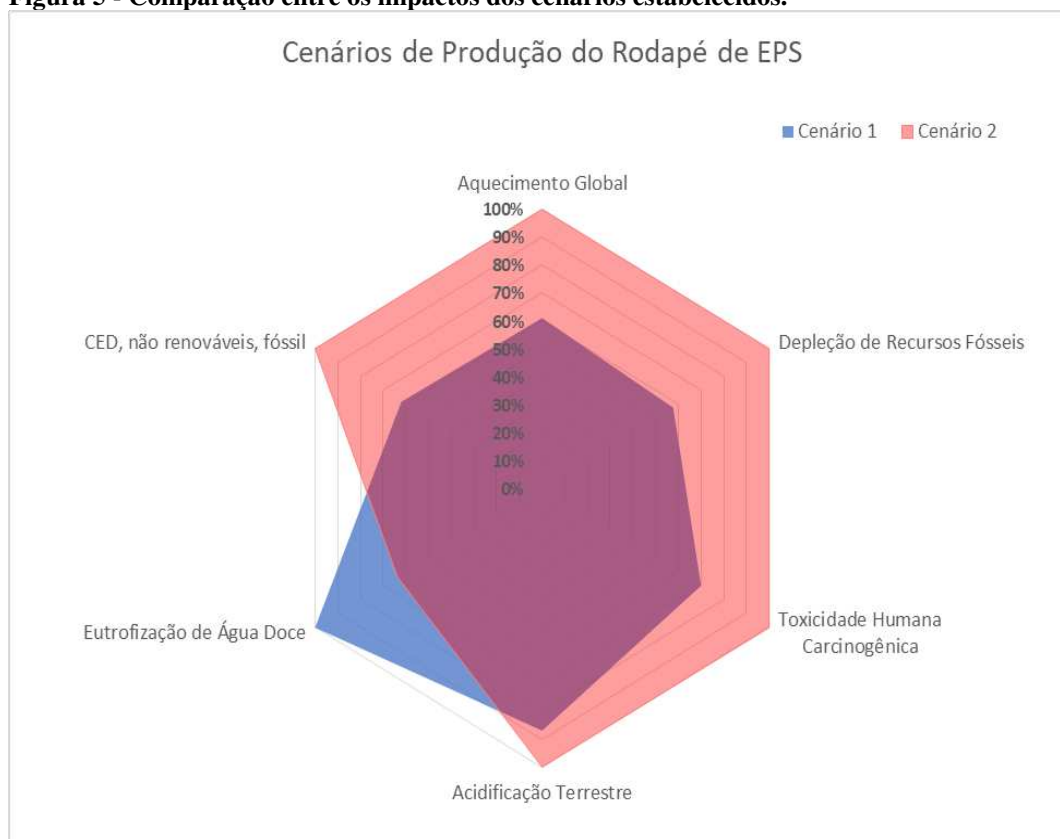
forma, de maneira geral, o impacto dos dois sistemas frente à acidificação terrestre é semelhante, porém, por razões distintas.

A última categoria de impacto analisada, Demanda Acumulada de Energia – Não Renovável, Fóssil, demonstra que a produção do rodapé de EPS reciclado é 40% menos impactante do que a produção por meio da matéria prima virgem. Ainda que o Cenário 1 tenha maior consumo de energia elétrica derivada dos processos de triagem, processamento e

produção do rodapé, essa categoria de impacto nos mostra que a produção do EPS virgem tem um consumo energético ainda maior, correspondendo a $8,91E+04$ MJ. Dessa forma, a produção do rodapé é mais energeticamente custosa no Cenário 1, entretanto, ao considerarmos o consumo energético necessário para a produção da matéria prima, o Cenário 2 se torna mais impactante.

A fim de ilustrar os resultados em relação ao desempenho ambiental da produção do rodapé de EPS reciclado ou EPS virgem através das categorias de impacto, foi elaborado o gráfico exibido pela Figura 5. Nele, pode-se notar que o Cenário 1 causa menos impactos ambientais em comparação com o Cenário 2. Com base nos dados apresentados e nos resultados da ACV, a produção de rodapé a partir do EPS virgem deveria ser evitada caso a mesma produção a partir de reciclagem de EPS em ciclo aberto seja uma opção. Dessa forma, a ACV realizada demonstra que a empresa tem evitado impacto ambiental ao optar pela construção da cadeia produtiva do rodapé de EPS reciclado, visto que, além de proporcionar uma segunda vida a um material que seria descartado, o modelo de negócio da empresa é ainda menos ambientalmente impactante do que a produção do rodapé a partir do EPS virgem.

Figura 5 - Comparação entre os impactos dos cenários estabelecidos.



Com base nos resultados da ACV, alguns pontos do sistema descrito pelo Cenário 1 podem ser levantados no tocante à perspectiva ambiental. Este cenário requer um maquinário mais complexo em comparação com o Cenário 2 devido aos processos de triagem, processamento e reciclagem do EPS. Dessa forma, a produção do rodapé de EPS reciclado depende fortemente do consumo de energia elétrica. O investimento em procedimentos que visem à melhoria de eficiência nos maquinários seria extremamente benéfico ao desempenho ambiental do produto.

Uma vez que a cadeia produtiva estudada apresenta alto consumo energético, o investimento na transição para uma matriz energética mais limpa apresentaria resultados

substanciais frente ao desempenho ambiental do sistema. Destaca-se o possível investimento em energias renováveis que vem apresentando grande aumento de mercado no Brasil, como a energia solar e eólica.

Outro ponto relevante para a melhoria da cadeia de valor se refere aos processos logísticos do EPS, tanto dentro das imediações da empresa, quanto em relação à cadeia logística responsável pelo transporte do EPS usado. Em referência às movimentações internas do EPS, que tem seu impacto ambiental derivado do consumo e emissões causadas pelo gás GLP, recomenda-se a revisão e otimização dos caminhos logísticos internos do processo produtivo. O maior controle destas movimentações, bem como uma análise crítica de sua necessidade, poderia contribuir com a melhoria do desempenho ambiental desta cadeia produtiva. A mesma lógica se aplica ao transporte do EPS entre as etapas do sistema de produto. O aperfeiçoamento logístico destes deslocamentos influenciaria diretamente na diminuição das emissões relacionadas ao ciclo de vida do rodapé, e melhoraria seu desempenho em relação às perspectivas ambientais.

Verifica-se que o investimento e melhoria do sistema de produto em relação ao consumo energético, movimentação interna, e cadeia logística da produção do rodapé de EPS reciclado proveria melhorias ambientais relevantes, uma vez que energia elétrica, consumo de GLP, e emissões derivadas do transporte são os três maiores fatores de impacto deste cenário. Ainda, a ACV nos ajuda a traçar melhores cenários para a reciclagem do EPS em relação à EC. Neste caso, o investimento em melhoria dos gargalos ambientais do sistema atenderia uma das prerrogativas da EC – a otimização do uso de recursos. Como presente no trabalho de Haas *et al.* (2015), o consumo de energia elétrica não é comumente destacado na avaliação da sustentabilidade de um sistema pela ótica da EC, esta esfera científica tem foco maior na discussão sobre resíduos. Dessa forma, como evidenciado pela ACV, a busca contínua pelo melhor desempenho ambiental do sistema, paralelamente traduzido em melhor atendimento aos princípios da EC, se dá através de processos de otimização no uso de recursos e energia, aqui descritas como os gargalos do sistema.

6. CONCLUSÃO

Este estudo teve o objetivo de avaliar os impactos ambientais de uma cadeia produtiva baseada na reciclagem em ciclo aberto do EPS através de uma ACV. Foram utilizados dados de uma empresa que produz rodapés para serem utilizados no setor de construção civil. A empresa, localizada no sul no Brasil, trabalha com a reciclagem de EPS provindo de fontes diversas. Os resultados deste estudo foram baseados na comparação entre o cenário real da produção do rodapé de EPS reciclado com um cenário fictício em que o produto seria fabricado a partir de EPS proveniente de matéria prima virgem.

A ACV, por meio das categorias de impacto selecionadas, evidenciou o benefício ambiental da reciclagem do EPS. Das seis categorias de impacto escolhidas (aquecimento global, depleção de recursos fósseis, acidificação terrestre, toxicidade humana carcinogênica, eutrofização de água doce e demanda cumulativa de energia), o Cenário 2 apresentou melhor resultado somente para a categoria de impacto eutrofização de água doce. Este fato evidencia que, para esta cadeia produtiva, o alinhamento com os princípios da EC contribui, de fato, com a diminuição dos impactos ambientais do sistema.

A EC é um conceito que vem ganhando forte atenção por diferentes setores, sendo que a avaliação quantitativa de sistemas circulares é imprescindível, no intuito de avaliar os reais benefícios ambientais destas atividades. A ACV é uma metodologia de avaliação de impactos ambientais potenciais já bem estabelecida e utilizada amplamente por indústrias, governos e na academia. Este estudo corrobora com o argumento de que a ACV é uma das metodologias mais adequadas para a avaliação dos impactos de sistemas circulares, uma vez que ela é capaz

de evidenciar os gargalos, *trade-offs* e pontos que necessitam de melhora no sistema, contribuindo para a tomada de decisão e real avaliação do benefício ambiental do sistema.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por financiar este estudo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, R.A.F.; PRUDÊNCIO DA SILVA, V.; SOARES, S.R. Comparison of the Ecological Footprint and A Life Cycle Impact Assessment Method For A Case Study On Brazilian Broiler Feed Production Reference. *Journal of Cleaner Production*, v. 28, p. 25-32, 2012.

Baumann, H.; Tillmann, A. The Hitch hiker's guide to LCA:: An orientation in Life Cycle Assessment methodology and applications. *Studentlitteratur AB*. 10, julho, 2004.

BLOMSMA, F.; BRENNAN, G. The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. *Journal of Industrial Ecology*, v. 21, n. 3, p. 603–614, 1 jun. 2017.

BROWN, M. T.; BURANAKARN, V. Emergy indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 38, n. 1, p. 1–22, 1 abr. 2003.

CHEN, Y. et al. Life cycle assessment of end-of-life treatments of waste plastics in China. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 146, p. 348–357, 1 jul. 2019.

CHERUBINI, E. et al. Life cycle assessment of swine production in Brazil: A comparison of four manure management systems. *Journal of Cleaner Production*, v. 87, p. 68-77, 2015.

DE OLIVEIRA, C. T.; M. LUNA, M. M. M.; CAMPOS, L. M. S. Understanding the Brazilian expanded polystyrene supply chain and its reverse logistics towards circular economy. *Journal of Cleaner Production*, v. 235, p. 562–573, 20 out. 2019. BSI 8001 – Framework for Implementing the Principles of the Circular Economy in Organizations (BSI, 2017)

DESCHAMPS, J. et al. Is open-loop recycling the lowest preference in a circular economy? Answering through LCA of glass powder in concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 185, p. 14–22, 1 jun. 2018.

ELIA, V.; GNONI, M. G.; TORNESE, F. Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 142, p. 2741–2751, 20 jan. 2017.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production, Towards Post Fossil Carbon Societies: Regenerative and Preventative Eco-Industrial Development*. v. 114, p. 11–32, 15 fev. 2016.

HAAS, W. et al. How Circular is the Global Economy?: An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005. *Journal of Industrial Ecology*, v. 19, n. 5, p. 765–777, 1 out. 2015.

HUYSMAN, S. et al. Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 120, p. 46–54, 1 maio 2017.

ISO. 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. ISO copyright office, 2006a.

ISO. 14044: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and guidelines. ISO copyright office, 2006b.

KALMYKOVA, Y.; SADAGOPAN, M.; ROSADO, L. Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resources, Conservation and Recycling, Sustainable Resource Management and the Circular Economy*. v. 135, p. 190–201, 1 ago. 2018.

KHARRAZI, A. et al. Advancing quantification methods of sustainability: A critical examination energy, exergy, ecological footprint, and ecological information-based approaches. *Ecological Indicators*, v. 37, p. 81–89, 1 fev. 2014.

KIRCHHERR, J. et al. Barriers to the Circular Economy: Evidence From the European Union (EU). *Ecological Economics*, v. 150, p. 264–272, 1 ago. 2018.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 127, p. 221–232, 1 dez. 2017.

LITHNER, D.; LARSSON, Å.; DAVE, G. Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *Science of The Total Environment*, v. 409, n. 18, p. 3309–3324, 15 ago. 2011.

MCDOWALL, W. et al. Circular Economy Policies in China and Europe. *Journal of Industrial Ecology*, v. 21, n. 3, p. 651–661, 1 jun. 2017.

SAIDANI, M. et al. A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production*, v. 207, p. 542–559, 10 jan. 2019.

SARMIENTO, A. M. et al. Expanded Polystyrene (EPS) and Waste Cooking Oil (WCO): From Urban Wastes to Potential Material of Construction. *Waste and Biomass Valorization*, v. 7, n. 5, p. 1245–1254, 1 out. 2016.

Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). *Guidelines for Life-cycle Assessment: A code of practice*. 3 April, 1993.

ULGIATI, S.; RAUGEI, M.; BARGIGLI, S. Overcoming the inadequacy of single-criterion approaches to Life Cycle Assessment. *Ecological Modelling*, v. 190, n. 3, p. 432–442, 25 jan. 2006.

VARGAS-GONZALEZ, M. et al. Operational Life Cycle Impact Assessment weighting factors based on Planetary Boundaries: Applied to cosmetic products. *Ecological Indicators*, v. 107, p. 105498, 1 dez. 2019.

WALKER, S. et al. Evaluating the Environmental Dimension of Material Efficiency Strategies Relating to the Circular Economy. *Sustainability*, v. 10, n. 3, p. 666, 1 mar. 2018.