



AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E SUA APLICAÇÃO NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

THAÍS DE SOUZA MIRANDA

RESUMO

O aumento da população resulta em maior geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), o que demanda uma gestão adequada para evitar impactos adversos no meio ambiente e na saúde humana. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil estabelece diretrizes para essa gestão. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que avalia o impacto ambiental de um produto ou serviço ao longo de todo o seu ciclo de vida, identificando potenciais impactos e oportunidades de melhoria. A ACV é especialmente relevante na gestão de RSU, fornecendo compreensão dos impactos ambientais, socioeconômicos e de saúde pública. Ela subsidia políticas públicas, promovendo a eficiência e responsabilidade na gestão de resíduos urbanos. O estudo foi conduzido por meio de uma análise qualitativa de publicações sobre ACV e sua aplicação na gestão de RSU, utilizando a metodologia da revisão sistemática da literatura. A ACV compreende quatro fases: definição de objetivo e escopo, inventário do ciclo de vida, avaliação de impactos e interpretação. A PNRS incentiva seu uso como ferramenta fundamental para uma gestão eficiente e sustentável de resíduos sólidos. A ACV auxilia na identificação de oportunidades de melhoria, na análise de diferentes opções de tratamento e na transição para uma economia circular. Apesar de suas vantagens, a ACV possui limitações e a falta de dados primários é um desafio em países em desenvolvimento. Estudos de ACV têm destacado a importância da reciclagem e a redução das emissões em aterros sanitários como estratégias eficazes. Dessa forma, a ACV é uma ferramenta crucial para uma gestão responsável e sustentável de RSU, alinhada com as diretrizes da PNRS. Sua aplicação promove a eficiência na gestão, a tomada de decisões informadas e o desenvolvimento de políticas mais eficazes, contribuindo para a busca por soluções mais sustentáveis na gestão de resíduos sólidos.

Palavras-chave: Impacto Ambiental; Política Nacional de Resíduos Sólidos; Gestão Sustentável; Indicadores Ambientais; Economia Circular.

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população resulta em um incremento na geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), o que requer uma consideração especial devido aos possíveis efeitos adversos no meio ambiente e na saúde humana que podem ser desencadeados por eles. Estes efeitos são frequentemente associados à ausência de uma gestão e administração adequadas dos resíduos (NASCIMENTO; CRUZ, 2017).

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil, estabelecida pela Lei 12.305/2010, define diretrizes para a gestão dos resíduos sólidos. A prioridade é a não geração, seguida por redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010). Isso visa a minimização do desperdício e a promoção de uma economia

sustentável. A PNRS também incentiva a recuperação energética dos RSU, desde que seja tecnicamente e ambientalmente viável. Princípios como desenvolvimento sustentável, ecoeficiência e responsabilidade compartilhada são fundamentais para reduzir resíduos e minimizar impactos ambientais na saúde humana e qualidade do ambiente.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta utilizada para avaliar o impacto ambiental de um produto ou serviço ao longo de todo o seu ciclo de vida (ABNT, 2014). A ACV considera todo o ciclo de vida de um produto ou serviço, desde a extração da matéria-prima até o descarte, para identificar potenciais impactos ambientais e oportunidades de melhoria.

No cenário desafiador da gestão RSU, a aplicação da ACV se torna particularmente relevante, proporcionando um entendimento aprofundado dos impactos ambientais, socioeconômicos e de saúde pública relacionados à geração, coleta, tratamento e disposição final de resíduos nas áreas urbanas. Ao considerar o ciclo completo dos RSU, a ACV não somente facilita a identificação de práticas mais sustentáveis, como também subsidia políticas públicas, promovendo a eficiência e a responsabilidade na gestão dos resíduos.

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo explorar de que maneira a ACV se aplica de forma crucial na gestão sustentável de RSU, fornecendo uma perspectiva valiosa para a tomada de decisões informadas e a promoção de práticas mais responsáveis e benéficas para o meio ambiente e a saúde pública.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo resulta de uma análise detalhada das fases da ACV e sua aplicabilidade na gestão de RSU. Além disso, destaca-se a relação entre a ACV e a PNRS. O texto aborda também a influência da ACV na tomada de decisões informadas e na promoção de práticas mais responsáveis em termos ambientais e de saúde pública. A PNRS, por sua vez, é apresentada como um suporte regulamentar que incentiva a utilização da ACV como ferramenta central para a gestão eficaz e sustentável de resíduos sólidos.

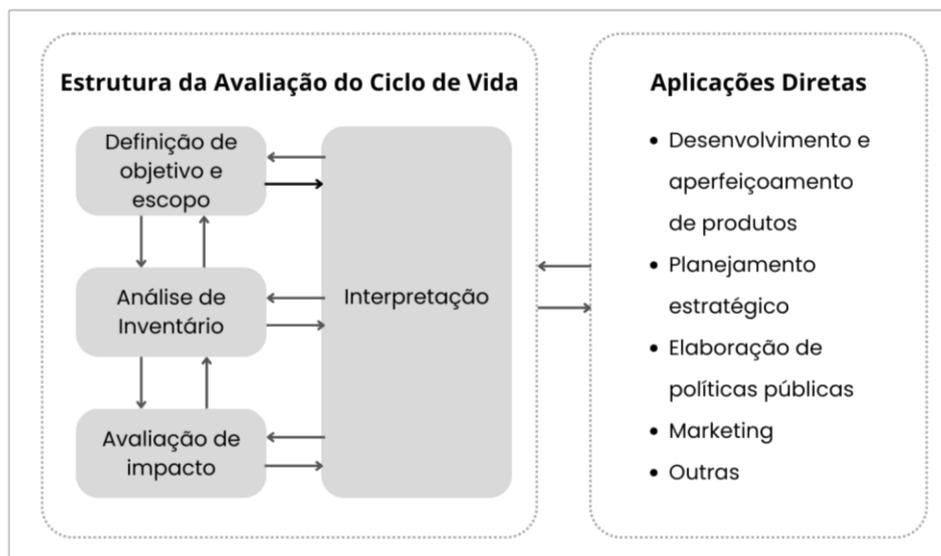
A metodologia descrita no texto se enquadra no âmbito da pesquisa exploratória, uma vez que busca explorar e compreender de que forma a ACV se aplica na gestão sustentável de RSU, bem como sua relação com a PNRS.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A norma NBR ISO 14040:2014 define a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como uma técnica utilizada para avaliar os impactos ambientais potenciais associados a um produto ou atividade durante seu ciclo de vida. Isso é feito através da compilação de um inventário das entradas e saídas, desde a extração da matéria-prima até a disposição final (ABNT, 2014a). Vale ressaltar que um aspecto ambiental se refere a qualquer elemento das atividades, produtos e serviços de uma organização que possa interagir com o meio ambiente. Por outro lado, o impacto ambiental representa qualquer modificação, positiva ou negativa, resultante de um aspecto (ABNT, 2012).

A estrutura metodológica da ACV compreende quatro fases distintas: definição de objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impactos e interpretação (ABNT, 2014a). O relacionamento entre as fases está ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Fases de uma ACV



Fonte: ABNT, 2014a.

De acordo com Reichert e Mendes (2014) como instrumento de gestão, a ACV permite que os atores sociais tomem decisões considerando os aspectos técnicos e o desempenho ambiental, além de auxiliar na identificação de oportunidades de melhoria ao longo do ciclo de vida analisado.

A ACV é um processo dividido em quatro fases. A primeira, chamada de Definição de Objetivo e Escopo, envolve delimitar as fronteiras do sistema, estabelecer a unidade funcional, escolher a metodologia de análise, definir os tipos e categorias de impacto, além de detalhar o nível desejado de análise. Esta etapa busca determinar o propósito e a extensão do estudo, definindo claramente o objetivo, razões para realizá-lo e público-alvo. A Unidade Funcional é uma medida do desempenho das saídas do sistema, servindo como referência para comparabilidade dos resultados. As Fronteiras do Sistema definem os processos incluídos na ACV, considerando vários estágios do ciclo de vida. A norma ISO 14.044 preconiza a escolha de categorias de impacto adequadas ao objetivo do estudo (ABNT, 2014b).

A segunda fase, o Inventário do Ciclo de Vida (ICV), consiste na coleta e modelagem de dados sobre entradas e saídas relevantes de um sistema. Isso inclui a quantificação de recursos utilizados e emissões liberadas no ar, água e solo (ABNT, 2014b).

A terceira fase, Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV), utiliza os dados do ICV para analisar os potenciais impactos ambientais, classificando, caracterizando e ponderando os resultados. Por fim, a Interpretação do Ciclo de Vida analisa os resultados obtidos e os utiliza para fundamentar conclusões e recomendações alinhadas com os objetivos do estudo (ABNT, 2014b).

A PNRS, define a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos (BRASIL, 2010). De acordo com essa política, o responsável pelos serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos deve seguir um plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos. Isso inclui:

- Adoção de medidas para reutilização e reciclagem dos resíduos sólidos;
- Implementação de um sistema de coleta seletiva;
- Colaboração com agentes econômicos e sociais para promover o retorno dos resíduos ao ciclo produtivo;
- Implementação da compostagem para resíduos orgânicos;
- Garantia de disposição final adequada para os resíduos e rejeitos gerados pelos serviços de limpeza e manejo de resíduos sólidos, levando em consideração os aspectos ambientais.

A utilização da ACV é incentivada pela PNRS como uma ferramenta fundamental para a gestão eficiente e sustentável dos resíduos sólidos. Um dos princípios da PNRS (BRASIL, 2010) é a prevenção e precaução, que visa evitar a geração de resíduos, reduzir sua periculosidade e minimizar os impactos ambientais e sanitários. Nesse sentido, com a ACV, é possível identificar os pontos críticos da geração de resíduos e adotar medidas preventivas.

Além disso, a PNRS tem como um de seus instrumentos a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, que envolve a participação de todos os envolvidos na cadeia produtiva, incluindo fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e o poder público (BRASIL, 2010). Desse modo, a ACV permite a análise e a quantificação dos impactos ambientais de diferentes opções de produtos e embalagens, auxiliando na tomada de decisões conscientes por parte dos diversos atores envolvidos, incentivando a adoção de práticas mais sustentáveis em relação aos resíduos sólidos.

Outro princípio da PNRS é a hierarquia de gestão dos resíduos, colocando a reciclagem e a valorização energética como opções de prioridade em relação à disposição final em aterros sanitários. Nesse contexto, a ACV avalia e compara as diferentes opções de tratamento dos resíduos sólidos, permitindo identificar quais processos de reciclagem ou valorização energética são mais eficientes e ambientalmente vantajosos, considerando fatores como consumo de energia, emissões de gases de efeito estufa e geração de resíduos secundários.

Ainda, PNRS estimula a transição da economia linear para uma economia circular, na qual os resíduos são considerados recursos e devem ser reintegrados no ciclo produtivo. Sendo assim, a ACV permite identificar oportunidades de melhorias em termos de reutilização, reciclagem e valorização de resíduos ao avaliar o ciclo de vida completo de um produto, contribuindo, assim, para indicar alternativas que reduzam a extração de recursos naturais, minimizem a geração de resíduos e promovam a utilização mais eficiente dos recursos disponíveis.

Outrossim, a ACV ajuda a reconhecer as etapas do ciclo de vida do gerenciamento de resíduos sólidos que têm os maiores impactos ambientais, possibilitando o desenvolvimento de estratégias de melhoria direcionadas, visando reduzir esses impactos específicos. Isto posto, a ACV permite a tomada de decisões mais informadas e escolhas que reduzam o impacto ambiental ao longo de todo o ciclo de vida, impulsionando a busca por soluções mais eficientes. De acordo com Manfredi *et al.* (2011), “a abordagem do ciclo de vida e o uso de ferramentas quantitativas, como a ACV, podem fornecer uma base científica para a tomada de decisões ambientalmente sustentáveis na gestão de resíduos sólidos”.

Essa ferramenta tem sido amplamente utilizada por diversos pesquisadores para avaliar e comparar tecnologias e cenários diferentes nesses sistemas, auxiliando na identificação das principais áreas que requerem melhorias (HENRIQUEZ, 2016).

Estudos conduzidos por Laurent *et al.* (2014) revelaram que as aplicações da ACV foram principalmente limitadas a países desenvolvidos, indicando que vários problemas ambientais específicos relacionados à gestão de resíduos em países em desenvolvimento não foram investigados. Além disso, a não geração de resíduos, que é a prioridade máxima na hierarquia de resíduos, também foi identificada como carente de uma metodologia operacional consistente dentro do contexto da ACV.

Nos países em desenvolvimento, a falta de dados primários e a compreensão do pensamento do ciclo de vida são provavelmente as principais razões para o número limitado de estudos publicados sobre esse tema.

De acordo com Henriquez (2016), em pesquisas recentes, o indicador de impacto ambiental mais comumente utilizado é o potencial de aquecimento global, mas os métodos e *softwares* utilizados podem variar em cada estudo.

Ressalta-se que todas as técnicas disponíveis para a reciclagem, destinação e tratamento

de resíduos sólidos acarretam a geração de impactos ambientais negativos. No entanto, é importante ressaltar que essas técnicas também têm o potencial de reduzir o consumo de recursos naturais, minimizar a poluição do solo, da água e do ar, além de contribuir para a preservação dos ecossistemas e a mitigação das mudanças climáticas.

Na avaliação de sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos, o contexto local desempenha um papel importante, pois determina parâmetros altamente variáveis, como a composição dos resíduos ou a associação de fontes de fornecimento de energia. Um estudo de ACV bem executado capturará essas especificidades locais (LAURENT *et al.*, 2014).

Assim como qualquer ferramenta de avaliação, a metodologia da ACV possui suas limitações. A norma NBR ISO 14.040 (2014a) destaca especificamente que a ACV não prevê impactos ambientais absolutos ou precisos. Os impactos ambientais são geralmente considerados "impactos potenciais", uma vez que os efeitos reais no meio ambiente das emissões e resíduos dependem de quando, onde e como eles são liberados.

Na busca por respostas para a questão dos resíduos sólidos no desenvolvimento sustentável, muitos esforços têm sido feitos no sentido de buscar a preservação dos bens ambientais, produção de energias limpas, redução de emissões de CO₂, e muitas outras saídas. Dessa forma, a ACV permite uma compreensão mais completa dos impactos ambientais gerados pelos resíduos sólidos, desde a sua geração até a sua disposição final. Isso possibilita identificar pontos críticos e tomar medidas para mitigar esses impactos ao longo de todo o ciclo de vida.

Além disso, a ACV facilita a comparação de diferentes opções de gestão de resíduos sólidos, permitindo avaliar os impactos ambientais de cada alternativa. Isso auxilia na seleção da melhor estratégia. A ACV também contribui para o desenvolvimento de políticas e regulamentações mais eficazes no âmbito da gestão de resíduos sólidos. Ao fornecer informações embasadas e quantificáveis sobre os impactos ambientais, auxiliando na definição de metas e diretrizes, direcionando esforços para soluções mais sustentáveis.

Vários estudos de ACV avaliaram diferentes estratégias de gestão de resíduos sólidos. Concluíram que a reciclagem e a redução das emissões em aterros sanitários têm impactos ambientais significativos. A compostagem, aumento da reciclagem e tratamento térmico foram indicados como melhorias eficazes. Compostagem prévia ao aterro reduziu as emissões em até 96%. O aterro sanitário é a principal fonte de aumento do aquecimento global. Reciclagem mostrou-se a forma de tratamento mais benéfica, com reduções substanciais nas emissões de metano e dióxido de carbono (HENRIQUEZ, 2016; MERSONI, 2016; OLIVEIRA, 2019; COSTA, LIETO E LOMBARDI, 2019; STEPANOV *et al.*, 2018; GOMES *et al.*, 2015).

Em suma, a ACV emerge como uma ferramenta essencial para a gestão eficiente e sustentável dos resíduos sólidos, conforme preconizado pela PNRS, fornecendo informações embasadas e quantificáveis sobre os impactos ambientais. Logo, sua utilização contribui para a seleção de estratégias mais eficientes, o desenvolvimento de políticas e regulamentações adequadas, a transição para uma economia circular e a busca por soluções que reduzam os impactos ambientais e promovam a sustentabilidade na gestão dos resíduos sólidos.

Estudos de ACV, no Brasil, tendem a crescer impulsionados pela PNRS (COELHO; LANGE, 2018). Mas a falta de dados sobre o gerenciamento de RSU e ICV geograficamente apropriados ao estudo, ainda continuam a ser barreiras para as pesquisas.

4 CONCLUSÃO

Em um contexto desafiador de gestão de RSU, a ACV é especialmente relevante, fornecendo uma compreensão aprofundada dos impactos associados à geração, coleta, tratamento e disposição final de resíduos urbanos. Ao considerar o ciclo completo dos RSU, a ACV facilita a identificação de práticas mais sustentáveis e subsidia políticas públicas,

promovendo eficiência e responsabilidade na gestão dos resíduos. Este estudo destaca a importância da ACV como uma ferramenta crucial na gestão sustentável de RSU, proporcionando uma perspectiva valiosa para a tomada de decisões informadas e a promoção de práticas mais responsáveis para o meio ambiente e a saúde pública. Com a PNRS como suporte regulamentar, a ACV se torna um instrumento essencial para uma gestão eficaz e sustentável dos resíduos sólidos, contribuindo para a busca de soluções que reduzam os impactos ambientais e promovam a sustentabilidade nesse contexto desafiador.

No entanto, a implementação dessas práticas pode enfrentar obstáculos como falta de financiamento, infraestruturas inadequadas e limitada conscientização e participação pública. Para superar essas barreiras, a colaboração entre *stakeholders*, incluindo agências governamentais, empresas de gestão de resíduos e o público, é crucial. Ademais, mudanças políticas e incentivos podem estimular a adoção de práticas sustentáveis de gestão de resíduos, e novas pesquisas podem identificar oportunidades de aprimoramento.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14.040: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2014a.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14.044: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2014b.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14.050: Gestão Ambiental - Vocabulário**. Rio de Janeiro, 2012.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [2010].

COSTA, Giulia; LIETO, Alessio; LOMBARDI, Francesco. LCA of a Consortium-Based MSW Management System to Quantify the Decrease in Environmental Impacts Achieved for Increasing Separate Collection Rates and Other Modifications. **Sustainability**, [s. l.], v. 11, n. 10, 16 maio 2019. DOI 10.3390/su11102810.

GOMES, Luciana Paulo; KOHL, Claudia Adriana; SOUZA, Caroline Lobato de Lima; REMPEL, Neuri; MIRANDA, Luis Alcides Schiavo; MORAES, Carlos Alberto Mendes. Avaliação ambiental de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos precedidos ou não por unidades de compostagem. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 449-462, jul/set 2015. DOI: 10.1590/S1413-41522015020000120751.

HENRIQUEZ, Aline Isabel Melo. **Análise de ciclo de vida (ACV) de sistemas integrados de tratamento de resíduos sólidos urbanos para cidades de médio porte**. Orientador: Prof. Dr. Jose Carlos Escobar Palácio. 2016. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

LAURENT, A. *et al.* Review of LCA studies of solid waste management systems—Part I: Lessons learned and perspectives. **Waste management**, v. 34, n. 3, p. 573-588, 2014.

MANFREDI, S. *et al.* Supporting environmentally sound decisions for waste management

with LCT and LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 16, n. 9, p. 937-939, 2011.

MERSONI, Cristina. **Avaliação do ciclo de vida como técnica de apoio à decisão no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no município de Garibaldi/RS**. Orientador: Prof. Dr. Geraldo Antônio Reichert. 2015. 152 p. Dissertação (Mestre em Engenharia e Ciências Ambientais) - Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, Universidade de Caixias do Sul, Caixias do Sul, 2015.

NASCIMENTO, C. M. T.; CRUZ, M. L. B. Resíduos sólidos: presença e ameaça no espaço geográfico. **GeoTextos**, [S. l.], v. 13, n. 2, 2017. DOI: 10.9771/1984-5537geo.v13i2.24581.

OLIVEIRA, Allan Luís Augusto Redes de. **Avaliação do ciclo de vida aplicada na gestão dos resíduos sólidos urbanos: estudo de caso do Distrito Federal**. Orientador: Prof. Dr. Armando de Azevedo Caldeira Pires. 2019. 96 p. Dissertação (Mestre em Ciências Mecânicas) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019.

REICHERT, Geraldo Antônio; MENDES, Carlos André Bulhões. Avaliação do ciclo de vida e apoio à decisão em gerenciamento integrado e sustentável de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, p. 301-313, 2014.

STEPANOV, Jansa; UBAVIN, Dejan; PROKIC, Dunja; BUDAK, Igor; STEVANOVIC-CARAPINA, Hristina; STANISAVLJEVIC, Nemanja. Comparison of municipal waste management systems using LCA. South Backa wast management region: a case. **Environment Protection Engineering**, [s. l.], v. 44, n. 3, 2018. DOI 10.37190/epe180303.