

## Debatendo a aplicação de ACV na ETE da lagoa da conceição: uma revisão crítica da aplicação de ACVs em ETES

### *Debating LCA application in Lagoa da Conceição's WWTP: a critical review on LCA applied to WWTPs*

Clayton Diogo Schinkel, Universidade Tuiuti do Paraná

clayton.schinkel@hotmail.com

#### Resumo

A ocupação irregular do território da Lagoa da Conceição em Florianópolis-SC, e deficiências na infraestrutura de tratamento de efluentes causaram impactos no estado trófico da Lagoa. Após o transbordo da Lagoa de Evapoinfiltração, em janeiro de 2021, essa alteração se acentuou. O transbordo evidenciou a necessidade de um olhar mais atento aos impactos gerados pelo sistema de gestão de efluentes do bairro da Lagoa através de uma visão holística. ACV (avaliação de ciclo de vida) é uma ferramenta reconhecida na quantificação de impactos ambientais causados por um produto/sistema. Assim, esse artigo se propõe a debater o uso de ACVs em ETES através de uma revisão narrativa da literatura, relacionando os resultados das aplicações com o caso da Lagoa. Essa revisão identificou 03 linhas de discussão: Uso de ACV para identificar pontos críticos e oportunidades de melhorias nas infraestruturas, comparação de infraestruturas convencionais e alternativas, e a circularidade do ciclo de vida em ETES.

**Palavras-chave:** ACVs (Avaliação de Ciclo de vida), Tomadas de decisão, Estação de Tratamento de Efluentes

#### Abstract

*The irregular occupation of the territory in Lagoa da Conceição, and the deficiencies on the wastewater management system, impacted negatively the trophic state of the coastal lagoon. After the wastewater overflow in Lagoa da Conceição's Wastewater Treatment Plant (WWTP) the impact increased. The overflow manifested the need for an accurate quantification of the impacts caused by the WWTP. LCA (Life Cycle Assessment) it's a recognized tool for quantifying environmental impacts caused by a product/system. Thus, this article aims to discuss the application of WWTPs through a critical review, establishing relations between the results found by these applications, and the use of LCA in Lagoa da Conceição's case. 03 lines of discussion were identified on the articles review: the role of LCA in identifying critical spots and improvement opportunities in WWTPs, comparison between conventional and alternative infrastructures, and the life circularity on WWTPs.*

**Keywords:** LCA (Life Cycle Assessment), Decision-Making, WasteWater Treatment Plants

## 1. Introdução

A paisagem da Lagoa da Conceição é fruto de uma ocupação que inicialmente deu-se junto aos morros, e logo espalhou-se pelo território em direção às águas da laguna. A ocupação urbana atual é desordenada apresentando-se como um conjunto confuso e sem planejamento, servido por uma rede viária composta de ruelas e caminhos, que se encontra saturada e não obedece a qualquer hierarquia dificultando a conexão da área (SANTIAGO E DANIEL, 2003).

Esse processo de desenvolvimento urbano sem planejamento e infraestrutura adequada vem alterando a qualidade da água da Lagoa da Conceição. Desde 2007, o seu estado trófico (capacidade de alimentar a produção primária) aumenta devido à entrada de efluentes ricos em nutrientes e matéria orgânica (DA SILVA et al., 2017; CABRAL et al., 2019).

O rompimento da barragem de uma das LEI (Lagoa de Evapoinfiltração) da ETE da Lagoa, que ocorreu no dia 25 de janeiro de 2021, atingiu a Lagoa despejando aproximadamente 100.000 m<sup>3</sup> de efluente com alto teor de matéria orgânica, nutrientes, e outros compostos químicos, é apenas uma consequência da negligência operacional do sistema de tratamento.

A dificuldade de planejamento imposta pelo traçado urbano irregular da Lagoa, em conjunto com o desastre ambiental do transbordo da LEI, evidenciam a necessidade de intensificar o olhar técnico sobre a infraestrutura urbana de coleta e tratamento de efluentes existente.

Há diversos métodos para avaliação de impactos ambientais (Análises Custo-Benefício, Análise de Riscos Ambientais, Pegada de Carbono...). Entre esses, a Avaliação de Ciclo de vida (ACV) é a mais abrangente em termos de impactos ambientais considerados (GUÉRIN-SCHNEIDER et al., 2018). ACV foi formalizada no final dos anos 1980 e emergiu para uma norma ISO em 2006 (ISO 14044).

A ACV é conhecida por ser uma ferramenta importante para mensurar impactos ambientais e econômicos, auxiliando nos processos decisórios (COROMINAS et al., 2020; GALLEGO-SCHMID et al., 2019; COROMINAS et al., 2013). No caso da Lagoa da Conceição, a aplicação de uma ACV no sistema vigente pode contribuir para futuras melhorias e modificações em seu planejamento urbano, levando a soluções de menor impacto ambiental, aumentando a qualidade de vida dos moradores locais, e assim colaborando para a reversão do processo de eutrofização das águas.

O objetivo deste artigo é revisar a aplicação das ferramentas de ACVs em sistemas de gestão e tratamento de efluentes, com vistas a debater sua aplicação no caso da Lagoa da Conceição. Para tal, foram observados os parâmetros e os resultados da implementação de ACVs em sistemas de gestão ambiental divulgados na literatura. O que se espera, é prover suporte ao uso de ACVs como uma ferramenta informacional para suporte à decisão que visem diminuir impactos ambientais e promover a sustentabilidade ambiental.

Com esse intuito, esse artigo se dedica a fazer uma revisão crítica de 10 artigos de estudos de aplicação de ACVs. Explorar a relação de aplicações de ACVs para tomadas de decisão informadas leva à algumas questões que esse artigo propõe discutir:

- como as experiências de aplicação de ACVs em ETES contribuem para maior sustentabilidade ambiental dos sistemas de gestão de efluentes?

- quais são os pontos críticos de impactos identificados nas ACVs?
- quais os perfis de oportunidades de melhorias identificadas nas ACVs comparativas?
- quais correlações são possíveis estabelecer entre o estado trófico da Lagoa e a contribuição das ACVs apresentadas?

Para responder as perguntas aqui propostas, o artigo está estruturado em quatro sessões resumidas a seguir. Na segunda seção será abordada a definição de ACV, e sua relação como ferramenta de avaliação de impactos ambientais e sua contribuição para tomada de decisão informada. A terceira seção é referente aos procedimentos metodológicos, que inclui uma caracterização da área de estudo. Na quarta seção, será apresentado a revisão de 09 artigos que relacionam a aplicação de ACVs em ETEs, na função de informante para tomadas de decisão. Na quinta e última seção, uma discussão acerca dos artigos apresentados, e algumas indicações em relação ao caso da lagoa.

## 2. A contribuição de ACVs para sustentabilidade ambiental

### 2.1 Ferramenta para promoção da sustentabilidade

ACVs desempenham um papel importante na promoção da sustentabilidade ambiental através do fornecimento de avaliações quantitativas de impactos ambientais de produtos, processos ou sistemas. Através de uma perspectiva que analisa o ciclo de vida completo de um produto ou sistema, “do berço ao túmulo”, as ACVs provém uma análise holística dos impactos ambientais causados pelo objeto de estudo. Diversas são as maneiras nas quais ACVs contribuem para sustentabilidade ambiental:

- avaliando o impacto Ambiental do objeto estudado: ACVs entregam uma perspectiva holística sobre os impactos relacionados ao ciclo de vida de um material, produto ou sistema (ISSO 14.040), não apenas localmente, mas em escala global;
- apoiando o processo para decisões mais sustentáveis: através de aplicações da ACV, e da quantificação de impactos ambientais. Dessa forma, tomadores de decisão podem se basear em dados e informações para tomar decisões mais assertivas na promoção da sustentabilidade.
- Promovendo eficiência na utilização de recursos: identificando oportunidades para diminuir o uso de recursos como água, e energia ou então no uso racional de matérias prima;

A ACV é uma ferramenta que fornece base para a adoção de medidas mitigadoras preventivas ou corretivas, preconizadas pela produção mais limpa (Sampaio Lopes et. al, 2017). Trata-se de uma metodologia importante pois trata com clareza de questões ambientais complexas, gerando números que permitem a tomada de decisões em bases objetivas. (COLTRO, 2007).

Apesar do seu sucesso, seu uso continua relativamente raro entre agentes públicos (BIDSTRUP, 2015). Uma possível explicação para tal fato, é a complexidade apresentada na aplicação do método para não-especialistas.

### 2.2 ACV como ferramenta para apoio à decisão informada

É evidente a necessidade de quantificar os impactos causados pelo sistema de coleta e tratamento de efluentes na região da Lagoa da Conceição. Entender quais são os pontos

críticos mais relevantes desse sistema para alteração do estado trófico da bacia hidrográfica, e em outras categorias de impactos, pode contribuir com melhores tomadas de decisão em relação à futuros cenários, mas também, na reversão do processo de eutrofização que a Lagoa se encontra.

As ACVs podem ser uma ferramenta valiosa para tomadas de decisões informadas, uma vez que conseguem abranger e quantificar o impacto ambiental do objeto avaliado. Como ferramenta de tomada de decisão ACVs podem ajudar a:

- identificar oportunidades de melhorias: identificando gargalos nos impactos produzidos em diferentes fases do ciclo de vida do objeto analisado;
- comparando cenários e soluções: além de identificar pontos de redução dos impactos causados, através da comparação da quantificação de impactos de diferentes produtos ou serviços, é possível identificar a opção menos impactante na perspectiva ambiental, e;
- promover transparência: através da quantificação real dos impactos causados, é possível comunicar a real performance ambiental de um determinado produto ou serviço;

De modo geral, ACVs têm um papel fundamental na promoção de análises quantificadas de impactos ambientais, provendo aos tomadores de decisão informações holísticas e científicas sobre o objeto estudado (GUÉRIN-SCHNEIDER et al., 2018).

## 3. Procedimentos metodológicos

O procedimento metodológico escolhido foi a realização de uma revisão narrativa da literatura acadêmica vigente. Foram utilizadas as palavras-chave: LCA (*Life Cycle Assessment*), *Decision-Making*, *WasteWater Treatment Plants*. Na busca pelos artigos optou-se por trabalhar com a string na língua inglesa. Um fator importante para a escolha de artigos, foi identificar artigos que trouxessem comparações entre cenários, deixando evidente a contribuição de ACVs como ferramenta para tomada de decisões. O limite dos sistemas das ACVs não foi fator decisivo na escolha dos artigos, apesar da maioria dos artigos selecionados tratarem apenas da fase operacional. Por último, priorizou-se artigos com relevância, utilizando a quantidade de citações como parâmetro.

A caracterização da área de estudo também fez parte do procedimento metodológico com a finalidade de entender as características urbanas do local, assim como da infraestrutura vigente (ETE da Lagoa da Conceição). Dessa forma, foi possível relacionar as características dos sistemas abordados nos estudos revisados com as características da infraestrutura do local.

## 4. Caracterização da área de estudo

A ocupação do território da lagoa da Conceição teve início em meados do século XVIII, com a construção da igreja Nossa Senhora da Conceição em 1751. Pelos 200 anos seguintes, a comunidade manteve-se em semi-isolamento, evoluindo demograficamente de forma natural, a partir, principalmente do crescimento vegetativo da população (SANTIAGO E DANIEL, 2003). Seu processo de urbanização, porém, iniciou-se apenas a partir de 1950, ocupando-se o sopé do morro da Lagoa, e o entorno da igreja Nossa Senhora da Conceição. A partir desse

núcleo partiam caminhos, sempre pelas terras baixas, onde foram se conformando moradias em forma de chácaras (SOUZA, 2003). Originadas pela delimitação dos sopés do morro, e pelas margens da bacia hidrográfica, resultou em um traçado urbano sinuoso, de glebas compridas, que se estruturam através de vielas e servidões.

O processo de divisão das antigas glebas ganhou impulso e produziu uma mudança significativa na paisagem (SOUZA, 2003). As grandes e estreitas parcelas de terra começam a ser desmembradas em lotes e a propriedade privada que passa a dirigir o crescimento urbano e o desenho de uma nova paisagem (BARBOSA et al., 2021).

A ETE Lagoa da Conceição foi implantada em 1987 e atendia uma população de 4.000 habitantes (BARBOSA et al., 2021). Desde sua implantação, a ETE recebeu algumas melhorias, e hoje conta com unidades de tratamento preliminares, tratamento secundário por reatores UASB, seguido de valas de oxidação, decantador secundário, e pós tratamento por desinfecção (Barbosa et al., 2021). Após essas etapas o efluente tratado é destinado para duas LEIs, que se localizam próximas à ETE, no Parque das Dunas da Joaquina.

Segundo Barbosa et al., (2021) diversas falhas no tratamento dos efluentes foram detectadas ao longo dos últimos anos pela Agência Reguladora de Serviços Públicos do Estado de Santa Catarina, essas falhas estão principalmente ligadas à ineficácia na remoção de nitrogênio e fósforo. Ademais, de acordo a NOTA TÉCNICA N°04 / PES (2021) o transbordo de 25 de janeiro de 2021, que lançou grande carga de fósforo e nitrogênio, associado à baixa capacidade de renovação das águas, promoveu um processo de hipereutrofização, estimulando o desenvolvendo de microalgas que absorvem os nutrientes.

## 5. Aplicações de ACVs em ETEs

Os estudos revisados demonstram uma variação de configurações e objetivos que passam por: mensuração de impactos de infraestruturas existentes, comparações entre cenários de reuso de subprodutos, comparação entre diferentes tecnologias, comparação entre métodos de avaliação, ou identificação de oportunidades de melhorias, entre outros... O quadro 1 apresenta um resumo dos artigos revisados contendo informações como: autores e ano da publicação, objetivo, escopo e fronteira do sistema, limitações, os cenários avaliados, metodologia de impacto utilizada, e os resultados obtidos.

Tabesh et al. (2019) utilizaram a ETE de Teerã, Irã, como objeto de estudo para uma aplicação de ACV a fim de identificar as fontes críticas de impactos ambientais causados pela infraestrutura existente. No estudo em questão, a aplicação de ACV permitiu concluir que a matriz energética do Irã acentua a média geral dos impactos ambientais causados pela ETE, por conta de seu alto gasto energético.

Garfi et al. (2017) utilizaram ACV como forma de realizar uma comparação entre uma ETE convencional com ETEs baseadas em sistemas “naturais” como Wetlands construídos, e Lagoas de Alta Taxa. A aplicação de mensurações parametrizadas na ACV permitiu a conclusão de que uma ETE convencional pode apresentar um potencial de impacto ambiental de 2 a 5 vezes maior que sistemas naturais.

O estudo de Renou et al. (2008) apresenta uma comparação entre 5 diferentes métodos de avaliação de impactos. O resultado demonstrou que na grande maioria dos impactos avaliados não houveram diferenças notáveis, com exceção das categorias de toxicidade. Essa conclusão ajuda a identificar que é preciso mais consenso entre as metodologias, em relação à impactos de toxicidade, para que ACVs se tornem ainda mais precisos.

Questões como a viabilização de estruturas de saneamento descentralizadas em comparação às estruturas centralizadas foram discutidas por Risch et al. (2021) e Opher & Fiedler (2016). Utilizando-se da ACV na avaliação de cenários comparativos entre estruturas centralizadas, em condições de densidade urbana diferentes, e à estruturas descentralizadas aplicadas na escala de uma residência, Risch et al. (2021) concluiu que o grau de viabilização entre tratamentos centralizados ou descentralizados dependem muito do contexto local (matriz energética, densidade urbana, topografia).

Quadro 1: Síntese das publicações

Tabela de artigos revisados					
Referência e local	Objetivo(s)	Escopo	Cenários	Método	Resultados
Irã. Tabesh, M., Feizee Masooleh, M., Roghani, B., & Motevallian, S. S. (2019).	- Identificar as fontes críticas de impactos ambientais causados pela ETE e comparar com cenários que propõe melhorias no sistema de tratamento.	ETE de lodo ativado, considerando desde a produção dos químicos utilizados no tratamento, seu transporte, fase de operação do tratamento, reuso de biogás, e descarte do lodo; <b>- Limitações:</b> Falta de informações de características do solo e do aquífero, portanto os impactos de irrigação dos plantios com efluentes tratados na salinização do solo e na dispersão de metais pesados não foram considerados.	- 1º cenário: a produção dos químicos utilizados no tratamento. - 2º cenário: uso de biogás para atender a demanda energética da planta; - 3º cenário: emissão dos gases subprodutos do tratamento de efluentes; - 4º cenário: transporte do lodo para ser utilizado em plantios;	Eco-Indicador 99 Endpoint	- O uso de biogás em vez de gás natural contribui significativamente para aliviar os impactos causados pela ETE avaliada; - Na comparação entre descarte do efluente tratado em um corpo hídrico, e no reuso para irrigação de plantios, o reuso na irrigação é uma prática mais ecológica, aliviando impactos de eutrofização;
Espanha. Pasqualino, J. C., Meneses, M., Abella, M., & Castells, F. (2009).	Através de uma ACV determinar os estágios de tratamento com maiores contribuições nos impactos avaliados, e propor cenários de melhoria para esses estágios.	ETE de convencional. Considera os químicos usados no tratamento, sua produção e logística, o transporte dos efluentes até a ETE, a energia consumida pela operação, serviços e manutenções; <b>- Limitações:</b> Não foram consideradas as fases de construção da infraestrutura e de outros produtos, assim como também não foi considerado a demolição da infraestrutura e equipamentos, e nem o sistema de distribuição de águas.	- 1º cenário: cenário existente da ETE; - 2º cenário: cenário que considera melhorias após aplicação de ACV no cenário existente. As melhorias são relativas à: alternativas de uso de biogás, e alternativas de descarte de lodo.	CML2000	- O tratamento líquido dos efluentes apresenta os maiores impactos relativos à: acidificação, mudanças climáticas, oxidação fotoquímica, e fatores abióticos. - O tratamento do lodo é o maior contribuinte para os impactos de eutrofização, eco toxicidade, e esgotamento de ozônio estratosférico. - O uso de biogás para geração de energia e calor para o reator aeróbico diminui os impactos gerados pelo tratamento líquido. - Reuso de lodo tratado diminui impactos gerados pela ETE estudada.
França. Renou, S., Thomas, J. S., Austin, E., & Pons, M. N. (2008).	Avaliar, através de um estudo de caso, a influencia dos métodos de avaliação de impacto utilizados	Considera a ETE convencional, atividades atreladas: produção de químicos, produção de eletricidade.	Apenas um cenário comparativo: utilização de 5 metodologias diferentes na mesma aplicação de ACV.	CML 2000, Eco Indicador 99,	- Na maioria das categorias de impactos não foram identificadas diferenças notáveis entre os resultados obtidos entre os métodos. A categoria de

	na aplicação da ACV em sistemas de tratamento de efluentes.	transporte de químicos, resíduos e lodo, e descarte em aterro. <b>- Limitações:</b> Apenas 5 categorias de impactos foram analisadas. A comparação dos métodos só foi realizada na fase de operação, deixando de fora as demais fases.		Ecopontos 97, EDIP 96 e EPS.	toxicidade apresentou diferenças notáveis, revelando que necessita mais consenso entre as metodologias.
Espanha. Garfi, M., Flores, L., & Ferrer, I. (2017).	Avaliar e comparar os impactos causados por formas alternativas de tratamento de efluentes (Wetlands e lagoas de alta taxa) em relação à um sistema convencional existente em comunidades pequenas.	Considera os fluxos de recursos materiais e energéticos para construção e operação (período de 20 anos) das infraestruturas, considerado também o descarte do lodo. <b>- Limitações:</b> Reuso de água tratada, e da biomassa de algas não foram considerados. Transporte dos materiais para a construção das infraestruturas também não foram contabilizados por serem considerados pouco representativos nos impactos causados.	Apenas um cenário comparativo entre três infraestruturas diferentes: ETE convencional, Wetlands Construído, e Lagoa de alta taxa.	ReCiPe midpoint	- Uma ETE convencional pode apresentar um potencial de impacto ambiental de 2 a 5 vezes maiores que sistemas naturais. <b>- Em termos de custo,</b> estruturas convencionais apresentar custos 2 a 3 vezes superiores em relação à sistemas naturais. Lagoas de Alta Taxa são as mais econômicas. <b>- Wetlands construídas e Lagoas de Alta Taxa</b> podem ajudar a diminuir impactos ambientais, e financeiros em pequenas comunidades.
Brasil. Lopes, T. A. S., Queiroz, L. M., Torres, E. A., & Kiperstok, A. (2020)	ACV de uma ETE composta por reator UASB seguida de Wetlands construída considerando as fases de construção e operação.	ETE composta por reator UASB + Wetlands construída. O sistema engloba coleta e bombeamento, pré-tratamento, desinfecção, descarte do lodo e do efluente tratado. <b>- Limitações:</b> Baixa qualidade de dados referentes à sistemas de tratamento de esgoto em países desenvolvidos. A ACV não avalia a eficiência das tecnologias de tratamento e as condições de funcionamento do sistema.	Não há cenários comparativos, apenas a discussão dos resultados da ACV de uma ETE descentralizada.	CML 2000 e Cumulativ e Energy Demand (CED)	- A fase de construção não deve ser excluída de ACVs aplicadas em tecnologias de baixa complexidade operacional (Wetlands construídos). Isso se deve ao nível de energia embutida nos materiais de construção utilizados (cimento e ferro). <b>- Emissão de gases</b> provenientes do reator UASB tem grande potencial de impacto na categoria de aquecimento global. Há uma correlação entre eficiência na remoção e nutrientes e Potencial de aquecimento global.
Canadá. Kobayashi, Y., Ashbolt, N. J., Davies, E. G. R., & Liu, Y. (2020).	Avaliar e comparar a performance ambiental de vários sistemas descentralizados de tratamento de águas cinza que possam servir uma comunidade de pequena escala em	Aborda desde a construção das plantas de tratamento, da infraestrutura de coleta, as fases operacionais, assim como a fase de fim de ciclo. <b>- Limitações:</b> Por falta de dados, os valores	22 cenários ao total foram comparados. Todos os cenários foram avaliados em 03 escalas: 3.500 PE, 350 PE e 5 PE. Dentre os cenários é possível dividir em categorias: centralizado	TRACI midpoint	- Sistemas naturais de tratamento (Wetlands), nem sempre apresentam melhor performance em relação à outros sistemas como MBR. <b>- Economias por escala</b> em plantas de tratamento podem ser invalidadas por

	região de frios intensos.	de parâmetros usados nesse estudo não são específicos para tratamento de águas cinzas em regiões frias. Emissões diretas de dióxido de carbono na fase operacional não foram incluídas de acordo como as regras da IPCC de 2006.	convencional sem reuso de efluente tratado; Descentralizado de Wetlands Construída com e sem reuso de águas cinzas, Descentralizado de Membrana MBR com e sem reuso de água cinza;		impactos causados pelo sistema de coleta. <b>- Para maximizar os efeitos benéficos ambientais</b> de ETEs descentralizadas, é recomendado a reutilização de águas cinzas; <b>- Considerar os impactos</b> da matriz energética na fase de operação é necessário para eficácia da ACV;
Israel. Opher, T., & Friedler, E. (2016).	Introduzir a ACV como meio de pensar políticas ambientais no gerenciamento de ETEs, através de um estudo comparativo que avaliou ETEs hipotéticas, de sistemas centralizados e descentralizados, com e sem reuso de águas tratadas.	Sistema centralizado, e sistemas descentralizados com e sem reuso de água. Considerado desde a construção e operação do sistema de coleta, planta de tratamento, e reuso de águas.	04 cenários avaliados: cenário convencional sem separação e reuso de água tratada, e cenários com separação de águas cinzas e negras, e tratamento e reuso em escalas diferentes.	ReCiPe 1.07 Midpoint	- A maioria dos impactos é dominada pela produção energética, que no caso de Israel apenas 10% da matriz energética provém de fontes renováveis. <b>- A fase de construção</b> não é representativa em relação a maioria das categorias de impacto, mas se mostra representativa no esgotamento de metais; <b>- Taxas altas de vazamentos</b> no sistema de coleta aumentam impactos de eutrofização;
Suécia. Shanmugam, K., Gadhamshetty, V., Tysklind, M., Bhattacharyya, D., & Upadhyayula, V. K. (2022).	Desenvolver e aplicar uma estrutura de avaliação orientada para sistemas de tratamento de efluentes com objetivo de auxiliar na formulação de estratégias de melhoria da performance circularidade no gerenciamento de efluentes. ACV foi utilizada em situação hipotética avaliando 5 cenários de melhorias da circularidade da ETE estudada.	Abrange a fase a operação da ETE, tratamento do lodo, e combustão de biogás. Nos cenários de melhoria de circularidade foi avaliado a utilização dos subprodutos de cada cenário. <b>- Limitações:</b> Dificuldades em incorporar prioridades regulatórias conflitantes; A estrutura desenvolvida é incapaz de avaliar sistemas de tratamento naturais.	05 cenários avaliados. Um cenário base "business as usual" sem reuso de gás, ou de lodo tratado, e outros cenários considerando diferentes reusos de biogás e do lodo tratado.	Método do IPCC (midpoint) + Ecoinvent + Método de Boulay + ILCD-2011 Midpoint+ (v. 1.08)	- A estrutura de avaliação desenvolvida demonstrou pontos positivos, podendo ser aplicado a diferentes tipologias de ETEs e reuso de subprodutos, apresentou modularidade de dados, e apresentou correlação entre as melhoras na circularidade e retorno financeiro;

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 6. Discussão

Apesar de largamente utilizada para fins científicos, como o uso de governanças municipais, as ACVs ainda são uma ferramenta pouco utilizada, principalmente pela sua dificuldade técnica, i.e., a falta de base de dados confiáveis, complexidade laboral, e softwares abertos.

Todos os estudos relacionam que as ACVs são de vital importância para a tomada de decisão informada, e na promoção da sustentabilidade ambiental no gerenciamento do

tratamento de efluentes urbanos. Dentro dos artigos revisados há 03 linhas de pesquisas identificadas que demonstram como essas experiências contribuem para o alcance de maior sustentabilidade ambiental na gestão de efluentes. Dividiremos essas linhas em subseções, com uma subseção a mais de observações gerais. Em cada subseção se discutirá possíveis aplicações de ACVs relacionadas aos resultados dos artigos estudados.

## 7. Identificação de pontos críticos e oportunidades

O propósito de todo sistema de tratamento de efluentes é mitigar a exposição humana à poluentes danosos provenientes desse processo. Definir aonde estão os pontos críticos dos impactos gerados evidencia pontos a serem melhorados nessas infraestruturas, e também oportunidades para aumento da circularidade do efluente tratado.

Relações entre as fases de construção e operação demonstram ser um ponto crítico na escolha de um sistema de tratamento de efluente. Em ETEs centralizadas e convencionais, a contribuição do alto gasto energético em fase operacional demonstra ser um ponto crítico dessa tipologia, como confirmado nos estudos de Renou et al. (2008), Pasqualino et al. (2009), Opher & Fiedler (2016), Tabesh et al. (2019), Lopes et al. (2020), e Kobayashi et al. (2020). A fase operacional de plantas convencionais demanda um alto consumo de energia, principalmente na fase de tratamento do efluente líquido como Pasqualino et al. (2009) descreve em seu estudo, demonstrando como o reator aeróbio de uma ETE pode representar até 70% do consumo energético. A matriz energética demonstra ser um fator influente nessa tipologia de estrutura, como foi demonstrado por Opher et al. (2016), que em seu estudo identificou que a maioria dos impactos identificados eram provenientes da matriz energética de base não renovável. Por outro lado, Lopes et al. (2020) afirma que uma matriz energética baseada em sistema hidráulico (renovável) pode contribuir para diminuir impactos relativos à fase de operação de uma ETE.

No caso de ETEs que contam com reatores anaeróbios, é identificado como oportunidade a captação e reuso de biogás para abastecimento elétrico de ETEs, como confirmam Pasqualino et al. (2009) e Tabesh et al. (2019).

No caso da ETE da Lagoa, apesar de contar com matriz energética considerada renovável, descobrir através de uma ACV qual a influência da matriz energética na média dos impactos específicos possibilitaria entender se o gasto energético é um ponto crítico a ser avaliado, e se, portanto, seria necessário ou não buscar fontes alternativas de suprimento de energia, ou então, mudanças no sistema vigente. Comparar o sistema centralizado da ETE da Lagoa, com sistemas alternativos de tratamento é necessário para entender se há melhores maneiras de lidar com os efluentes, e portanto, evitando a contaminação da Lagoa.

## 8. Comparação de infraestruturas

Os estudos de Renou et al. (2008), Opher & Fiedler (2016), Garfi et al (2017), Kobayashi et al. (2020), Risch et al (2021), e Shanmugam et al (2022) demonstram o potencial que aplicações de ACVs tem para comparação de infraestruturas, uma vez que a mesma tem o potencial de prover informações para apoiar processos decisórios, pela identificação de pontos críticos nos impactos gerados em todo seu ciclo de vida.

Quando comparados sistemas convencionais, e sistemas de base natural, há um consenso de que sistemas convencionais tem potencial de impacto muito maior que de base natural,

podendo ser de 2 a 5 vezes mais impactantes, segundo Renou et al. (2008). Isso se deve a alguns fatores, o principal é a baixa dependência do uso de energia elétrica para seu funcionamento, e a diminuição no uso de químicos. Além de se provarem mais ambientalmente sustentáveis, os sistemas de base natural também se provaram menos custosos.

A influência da centralização, ou não, de ETEs também é um ponto importante a ser discutido, e também demonstram variações que dependem de contextos específicos como mencionado anteriormente. Opher & Fiedler (2016) demonstraram que sistemas descentralizados, diante das condições testas em seu estudo, são preferíveis ao uso de um sistema centralizado, mas recomendam testes em diferentes contextos. Risch et al. (2021) demonstram em seu estudo que sistemas centralizados apresentam menor impacto à categoria de ecossistemas (endpoint), mas apresentam maior impacto à categoria de recursos. Quanto à categoria de impactos à saúde humana não houve uma definição clara.

Porém, para ter uma comparação assertiva entre tipologias de sistemas e de sua distribuição, Risch et al. (2021), afirma que é necessário entender o contexto local, dependendo do tamanho da população, características geográficas, e matriz energética utilizada.

As comparações entre diferentes fases do ciclo de vida de um sistema de tratamento de efluente é um ponto bastante discutido entre os estudos revisados. De acordo com Lopes et al. (2020), a fase de construção não pode ser excluída das ACVs quando avaliados sistemas de base natural, pois a energia embutida dos materiais de construção tem papel representativo no potencial de impactos. Na contramão, no estudo de Opher et al. (2016) argumenta-se que a fase de construção é pouco significativa em relação à fase de operação, devido ao alto gasto energético da mesma. Essa diferença entre estudos reforça o argumento de que a matriz energética é altamente determinante nos impactos de uma ETE quando se estuda sistemas convencionais.

## 9. Circularidade

Há diversas maneiras de melhorar a circularidade do ciclo de vida de sistemas de tratamento de efluentes. A separação de águas cinzas e negras pode propiciar uma melhora nos impactos, como abordam Opher & Fiedler (2016), Kobayashi et al. (2020), e Shanmugam et al. (2022), através do reuso de águas cinzas seja para usos potáveis ou não potáveis. Shanmugam et al. (2022) evidencia que o reuso de água cinza é uma maneira de evitar o descarte de efluentes diretamente em corpos hídricos, dessa forma diminuindo impacto relativo à eutrofização. No caso de Opher & Fiedler (2016), que em seu estudo compararam diferentes sistemas de tratamento em uma cidade hipotética com dados de Israel, o reuso de água (potável e não potável) também beneficiaram a queda de impactos ambientais, pois a principal fonte de suprimento de água provém de dessalinização de água do mar.

Como mencionado anteriormente, em ETEs convencionais o alto gasto energético pode influenciar diretamente os impactos ambientais. Nesses casos, a reutilização de biogás gerada por reatores anaeróbios pode ser uma medida mitigadora. No estudo de Tabesh et al. (2019) identificou-se que se canalizado e reutilizado, o biogás gerado pelo sistema de tratamento era suficiente para atender a demanda de energia, portanto, ajudando a reduzir os impactos causados pela matriz energética. Shanmugam et al (2022) criou uma estrutura de avaliação para determinação de “futuras opções circulares”, avaliando opções de reuso de biogás, e

reciclagem de lodo. Esse estudo identificou que o biogás gerado pela planta abrangia 88% da energia demandada reduzindo significativamente o uso de energia provindo da matriz energética Indiana que é baseada na queima de carvão. O estudo também comparou outros usos de biogás, como para gás de cozinha, e como combustível para ônibus. Em relação à reciclagem do lodo, usos como fertilizante do solo, insumo para produção de cimento, ou produção de *hydrochar pellets*, são opções de reciclagem apresentadas por Pasqualino et al. (2009) e Shanmugam et al (2022).

Pensando no caso da lagoa, praticar o descarte do lodo em aterro, a não reutilização do biogás, e o despejo do efluente tratado em corpo hídrico próximo, são aspectos que podem ser repensados através do ponto de vista da circularidade. Algumas possibilidades de estudos de aplicação de ACVs no contexto da lagoa surgem em decorrência dessa pesquisa. Por exemplo, a comparação de estruturas descentralizadas e de base natural para tratamento de águas cinzas diminuindo o efluente enviado à LEI. Repensar o envio de lodo tratado à aterros, dando outros usos que possam ser mais produtivos como condicionador de solo, ou para indústria cimentícia. A reutilização de biogás também poderia ser um cenário a ser estudado, avaliado o reuso para prover gás de cozinha para moradores impactados pelo transbordo da LEI da Lagoa.

## 10. Observações gerais

Entre os artigos avaliados, a falta de base de dados adequada para especificidades locais é uma das limitações mais recorrentes entre os estudos. A necessidade de dados específicos faz com que a fase de inventário seja uma das mais laborais, e também a mais importante para o sucesso da aplicação da ACV, pois os dados de entrada influenciam completamente a quantificação dos impactos gerados. Pensando em nível nacional, a construção de uma base de dados poderia contribuir com o cenário atual facilitando a elaboração de novos e diversos estudos na área.

## 11. Conclusão

Apesar de ainda incipientes, os estudos de aplicação de ACVs em ETEs já demonstram uma grande carga de possíveis funções de ACVs para a promoção da sustentabilidade ambiental através da tomada de decisões informadas.

No caso da Lagoa da Conceição, que se encontra em estado trófico avançado, em grande parte pela influência de problemas associados ao tratamento (ou a falta deste). Os estudos de ACV revisados nesse artigo demonstram a mesma como uma ferramenta interessante para mapear pontos críticos dos impactos causados pelo sistema de gestão de efluentes responsável pelo saneamento do bairro.

Através de uma visão holística a aplicação de ACVs na Lagoa poderia auxiliar a identificar os pontos críticos dos impactos ambientais da ETE da Lagoa, assim como testar possibilidades de aumento de ciclo de vida através de cenários comparativos com o sistema original, ou então comparar estruturas alternativas de tratamento de efluentes com a estrutura existente.

## Referências

- BARBOSA, Leticia (coord.). RELATÓRIO BACIA HIDROGRÁFICA DA LAGOA DA CONCEIÇÃO **Saneamento Ambiental - Esgotamento Sanitário..** [S. l.], 2021. Disponível em: [https://www.marquitoagroecologia.com/\\_files/ugd/1fc524\\_a7a7a61a505744cb88473c39797ac91b.pdf](https://www.marquitoagroecologia.com/_files/ugd/1fc524_a7a7a61a505744cb88473c39797ac91b.pdf). Acesso em: 1 jan. 2023.
- BIDSTRUP, Morten. Life cycle thinking in impact assessment—Current practice and LCA gains. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 54, p. 72-79, 2015.
- COLTRO, Leda et al. Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão. **Campinas: Cetea/Ital**, v. 1, 2007.
- COROMINAS, Lluís et al. The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: A best practice guide and critical review. **Water research**, v. 184, p. 116058, 2020.
- COROMINAS, Lluís et al. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: state of the art. **Water research**, v. 47, n. 15, p. 5480-5492, 2013.
- GALLEGO-SCHMID, Alejandro; TARPANI, Raphael Ricardo Zepon. Life cycle assessment of wastewater treatment in developing countries: a review. **Water research**, v. 153, p. 63-79, 2019.
- GARFÍ, Marianna; FLORES, Laura; FERRER, Ivet. Life cycle assessment of wastewater treatment systems for small communities: activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds. **Journal of Cleaner Production**, v. 161, p. 211-219, 2017.
- GUÉRIN-SCHNEIDER, Lætitia et al. How to better include environmental assessment in public decision-making: Lessons from the use of an LCA-calculator for wastewater systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 1057-1068, 2018.
- KOBAYASHI, Yumi et al. Life cycle assessment of decentralized greywater treatment systems with reuse at different scales in cold regions. **Environment international**, v. 134, p. 105215, 2020.
- LOPES, Thaís AS et al. Low complexity wastewater treatment process in developing countries: A LCA approach to evaluate environmental gains. **Science of The Total Environment**, v. 720, p. 137593, 2020.
- OPHER, Tamar; FRIEDLER, Eran. Comparative LCA of decentralized wastewater treatment alternatives for non-potable urban reuse. **Journal of environmental management**, v. 182, p. 464-476, 2016.



PASQUALINO, Jorgelina C. et al. LCA as a decision support tool for the environmental improvement of the operation of a municipal wastewater treatment plant. **Environmental science & technology**, v. 43, n. 9, p. 3300-3307, 2009

PES – Projeto Ecoando Sustentabilidade (Santa Catarina). **Nota Técnica N°03/PES/2021**. Mortandade de organismos e cheiro de água podre na Lagoa da Conceição. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 25 de fevereiro de 2021. 13p.

PES – Projeto Ecoando Sustentabilidade (Santa Catarina). **Nota Técnica N°04/PES/2021**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2021. 15 p.

RENOU, S. et al. Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA. **Journal of cleaner production**, v. 16, n. 10, p. 1098-1105, 2008.

RISCH, Eva; BOUTIN, Catherine; ROUX, Philippe. Applying life cycle assessment to assess the environmental performance of decentralised versus centralised wastewater systems. **Water Research**, v. 196, p. 116991, 2021.

SANTIAGO, Alina Gonçalves et al. Espaços livres e forma urbana: interpretando características e conflitos em Florianópolis (SC). **Paisagem e Ambiente**, n. 33, p. 51-66, 2014.

SHANMUGAM, Kavitha et al. A sustainable performance assessment framework for circular management of municipal wastewater treatment plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 339, p. 130657, 2022.

SILVA, Victor Eduardo Cury et al. Space time evolution of the trophic state of a subtropical lagoon: Lagoa da Conceição, Florianopolis Island of Santa Catarina, Brazil. **RBRH**, v. 22, 2017.

TABESH, Massoud et al. Life-cycle assessment (LCA) of wastewater treatment plants: a case study of Tehran, Iran. **International Journal of Civil Engineering**, v. 17, p. 1155-1169, 2019.

## Caracterização Físico-Mecânica de Solo-Cimento para fins de produção de paredes em Taipa de Pilão

### *Physical-Mechanical Characterization of Soil-Cement for the Production of Rammed Earth Walls*

**Anderson Renato Vobornik Wolenski, Doutor, Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), campus São Carlos, Docente de Estruturas e Tecnologias da Construção Civil.**

[anderson.wolenski@ifsc.edu.br](mailto:anderson.wolenski@ifsc.edu.br)

**Cristiano Augusto Heuser, Graduando, Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).**

[cristiano.h03@aluno.ifsc.edu.br](mailto:cristiano.h03@aluno.ifsc.edu.br)

**Éder Luciano Welter, Graduando, Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).**

[eder.lw@aluno.ifsc.edu.br](mailto:eder.lw@aluno.ifsc.edu.br)

**Ezequiel Koppe, Doutor, Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).**

[ezequiel.koppe@ifsc.edu.br](mailto:ezequiel.koppe@ifsc.edu.br)

**Cássio Alexandre Bariviera, Mestre, Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).**

[cassio.bariviera@ifsc.edu.br](mailto:cassio.bariviera@ifsc.edu.br)

#### **Resumo**

Pesquisas acerca dos sistemas construtivos e inovadores têm sido frequentes em ações que buscam edificações sustentáveis. A urgência por esta demanda tem levado a estudos que possam romper o paradigma da construção civil que visualiza, nos materiais não renováveis, a única forma exitosa em uma edificação. A Taipa de Pilão é uma alternativa exitosa, uma vez que tem a terra como principal componente, de modo a obter impacto no custo-benefício, redução no consumo energético e melhoria no conforto termo acústico. Neste sentido, o presente estudo caracterizou física e mecanicamente solos extraídos de 3 (três) municípios da região oeste de Santa Catarina, como forma de conceber paredes autoportantes em Taipa de pilão, sendo este um método construtivo altamente inovador para o contexto de uma edificação sustentável.

**Palavras-chave:** Resistência Mecânica; Sustentabilidade; Taipa de Pilão; Paredes Autoportantes.

#### **Abstract**

*Research on innovative construction systems has been frequent in actions that seek sustainable buildings. The urgency of this demand has led to studies that can break the paradigm of the*