

Avaliação do ciclo de vida de um sistema integrado UASB/biofiltro anaeróbico com *wetlands* construídos e filtro misto com suporte reativo no tratamento de efluentes urbanos

Life cycle assessment of an integrated system UASB/anaerobic biofilter with constructed wetlands and filter mixed with reactive support in the treatment of urban effluents

Eduardo Ezequiel Sosa¹, Gustavo Stolzenberg Colares¹, Igor Ricardo Conrad¹, Gabriela Caroline Kroth¹, Adriane Lawisch Rodriguez¹, Leticia Mesacasa¹, Deison Antonio Taufer Fochi¹, Daniel Brinckmann Teixeira¹, Fábio Oliveira¹, Ênio Leandro Machado^{1*} 

RESUMO

Nesta pesquisa, foi estudado o impacto ambiental do sistema UASB/Biofiltro Anaeróbico (reator anaeróbico de manta de lodo – UASB/BFA) + *wetland* construído do tipo *floating* (WCF) + *wetland* construído de fluxo vertical-célula de combustível microbiana (WCFV-CCM) + filtro misto com suporte reativo (FLR), aplicado para remediação em escala piloto de efluentes urbanos em um campus universitário. Foram feitos cenários de propostas de mudanças das configurações da estação de tratamento de efluente (ETE) (Cenários 2 e 3). O sistema do Cenário 1 foi operado em pulsos, com aplicação de 2,9 m³ de efluente de *campus* universitário semanalmente. A energia necessária para o bombeamento na unidade em escala piloto (Cenário 1) e para a potencial aplicação com fluxo por escoamento (Cenário 2) foi inventariada, considerando materiais de construção e processamento, especialmente com o controle de carga poluente nos efluentes líquidos e atmosféricos. O *software* SimaPro 8.0.4 foi utilizado, tendo como unidade funcional 2,9 m³ semana⁻¹ de efluente e fluxo de referência de 20 anos. Os resultados demonstraram que os materiais da construção do sistema contribuíram com 84,8% (em pontuação única – Pt), e a operação do sistema do Cenário 2 contribuiu com 15,2%, sem o uso de energia elétrica para o bombeamento. Já o Cenário 3 mostrou que a substituição dos tanques de fibra de vidro por tanques de fibrocimento poderia ajudar a reduzir os impactos ambientais na fase de construção do sistema em até 58,6% em termos de uso de energia e até 80% nas emissões de poluentes carcinogênicos.

Palavras-chave: avaliação do ciclo de vida; *wetlands* construídos; sustentabilidade.

ABSTRACT

This research studied the environmental impact of the UASB/anaerobic biofilter system (anaerobic sludge blanket reactor – UASB/ABF) + floating-type constructed wetland (FCW) + vertical flow constructed wetland – microbial fuel cell (FVCW-MFC) + mixed filter with reactive support (MFRS), applied for pilot-scale remediation of urban effluents on a university campus. Scenarios for proposed changes to the settings of the wastewater treatment plant (WTP) were made (Scenarios 2 and 3). The Scenario 1 system was operated in pulses, with the application of 2.9 m³ of university campus effluent per week. Energy required for pumping in the pilot scale unit (Scenario 1) and for potential application with runoff flow (Scenario 2) were inventoried, considering materials for construction and processing, especially with the control of pollutant load in liquid and atmospheric effluents. The SimaPro 8.0.4 software was used, with a functional unit of 2.9 m³ week⁻¹ of effluent and a reference flow of 20 years. The results showed a contribution of 84.8% (in single score – Pt) for the system's construction materials, as well as 15.2% for the operation of the Scenario 2 system, without the use of electricity for pumping. Scenario 3, on the other hand, showed that replacing fiberglass tanks with fiber cement tanks could help reduce environmental impacts during the construction phase of the system by up to 58.6% in terms of energy use and up to 80% in emissions of carcinogenic pollutants.

Keywords: life cycle assessment; constructed wetlands; sustainability.

¹Universidade de Santa Cruz do Sul – Santa Cruz (RS), Brasil.

*Autor correspondente: enio@unisc.br

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental da Universidade de Santa Cruz do Sul, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – Edital FAPERGS/CNPq 07/2022, Programa de Apoio à Fixação de Jovens Doutores no Brasil (70222.73723375.26112022), e Edital FAPERGS 07/2021, Programa Pesquisador Gaúcho – e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Bolsa Produtividade/2021.

Recebido: 21/09/2022. **Aceito:** 31/07/2023

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de sistemas de tratamento de efluentes integrados está gerando, cada vez mais, pesquisas que visam potencializar a eficiência do tratamento, reduzir os impactos ambientais, promover o reúso de água tratada, gerar energia e recuperar nutrientes. Há referência à organização de um escopo onde os cenários de estudo criam situações para transformar uma ETE em uma unidade de proteção ambiental produtiva e sustentável (YU; WANG, 2021). Além disso, diferentes configurações estão associadas a indicadores de sustentabilidade que abrangem aspectos ambientais, sociais, econômicos e técnicos. Esses indicadores são analisados usando um modelo de decisão multicritério com ponderações (OMRAN *et al.*, 2021).

No trabalho de Omran *et al.* (2021), as dimensões ambientais consideram o uso/ocupação do solo, a poluição do ar, a utilização de energia, a remoção de poluentes, a remoção de substâncias tóxicas, a emissão de odores, o incômodo associado ao ruído, o uso de produtos químicos, a geração de lodo e a qualidade desse lodo, além da urbanização harmoniosa com a ETE. Na mesma pesquisa, a dimensão social inclui a aceitação cultural (conscientização, patrimônio cultural, qualidade de vida, participação pública, responsabilidade e tamanho da comunidade servida), a segurança pública, a criação de empregos, os requisitos de competência e treinamento, bem como o desenvolvimento local.

A questão econômica relaciona-se ao custo de construção, ao custo de operação e manutenção da ETE, ao custo da área de ocupação, ao custo dos recursos utilizados (tipos de equipamentos mecânicos e elétricos e qualquer valor agregado), bem como aos salários e vencimentos do trabalho e às despesas com saúde e segurança. Além disso, aborda o desempenho econômico da produção e gestão dos resíduos gerados na ETE (OMRAN *et al.*, 2021). Adicionalmente, segundo esses autores, há referências a dimensões técnicas para a ETE, relacionando durabilidade, confiabilidade e flexibilidade, facilidade de construção e complexidade das unidades de saneamento.

Os autores Awad, Alalm e El-Etriby (2019) estudaram o desempenho ambiental de diferentes cenários para a melhoria das estações de tratamento de efluentes (ETEs) para efluentes urbanos no Egito, considerando o contexto de países em desenvolvimento. A aplicação da análise de ciclo de vida (ACV) foi acompanhada de análises econômicas para prognósticos em uma unidade de saneamento em Gamasa. O método CML 2000 (CML-IA é um banco de dados que contém fatores de caracterização para avaliação de impacto do ciclo de vida) foi utilizado para determinar sete categorias diferentes de impacto (unidade funcional de 1 m³ e fluxo de referência de 30 anos). Os cenários estudados foram:

- Cenário 1: estação de tratamento de águas residuais de Gamasa;
- Cenário 2: planta atual mais o processo de digestão anaeróbia;
- Cenário 3: planta atual mais o processo de tratamento terciário;
- Cenário 4: planta atual mais o processo de digestão anaeróbia e o processo de tratamento terciário.

Com oito fatores de impacto, sendo a Caracterização e a Normalização formas de apresentação dos impactos, o aquecimento global e a eutrofização surgem como as principais ações de impacto ambiental na ETE estudada para o tratamento de efluentes urbanos.

Destaca-se, na pesquisa anteriormente citada, que os materiais inventariados para a construção da ETE incluem cimento, aço, areia, brita e ocupação da área de terra para construção. Para os parâmetros de controle dos efluentes, os destaques foram DQO, DBO₅, N-NH₄⁺, P-PO₄³⁻. A avaliação econômica levou

em conta os custos de amortização e operação. Os custos totais de tratamento dos efluentes urbanos por m³ foram estimados em cerca de 0,003 \$ (USA), sendo que a recuperação de energia por digestão anaeróbia do lodo do tratamento secundário com lodos ativados recuperaria cerca de 0,002 \$ (USA) e o reúso de água tratada na ETE resultaria em 0,004 \$ (USA).

Serreli *et al.* (2021) conduziram estudos de ACV-Social considerando impactos sociais e econômicos de ETEs para efluentes contendo poluentes inorgânicos, especialmente fluoretos e fosfatos, e orgânicos, incluindo ácido acético e hidróxido de tetrametilamônio. Os autores utilizaram o banco de dados PSILCA (avaliação do ciclo de vida do impacto social do produto). A unidade funcional considerou a quantidade produzida de insumos químicos em toneladas por ano (6.300 t), levando em consideração uma média de horas de riscos para cada um dos colaboradores envolvidos. Nesse caso, avaliações de qualidade de vida foram associadas a fatores como trabalho infantil, saúde ocupacional, condições de trabalho adequadas, corrupção, responsabilidade social, migração, entre outros (19 itens no total).

Outra abordagem de sustentabilidade para uma ETE envolve ferramentas de balanço energético, análise econômica, avaliações de impacto ambiental e análise de ciclo de vida (SALVADOR *et al.*, 2014; CHEN *et al.*, 2020).

Nesse sentido, com o objetivo de desenvolver a sustentabilidade no tratamento de efluentes urbanos, propõe-se uma primeira etapa de investigações, a Avaliação do Ciclo de Vida dos Impactos Ambientais do sistema integrado de anaerobiose e *wetlands* construídos de configurações mistas (associados à célula de combustível microbiana — CCM) com uma unidade de filtração com meio reativo. Os dados de entradas e saídas do escopo mencionado anteriormente foram extraídos do trabalho de Colares *et al.* (2021). A unidade pode ser uma proposta tecnicamente viável para o tratamento de efluentes urbanos, especialmente nas configurações descentralizadas de saneamento, mas também deve examinar os elementos do escopo que incluem material e energia nas etapas de construção e operação do sistema.

METODOLOGIA

Objetivo e escopo

O objetivo inicial das atividades estabeleceu um inventário de ciclo de vida do sistema desenvolvido e estudado por Colares *et al.* (2021). O sistema operou em escala piloto durante o período de outubro de 2019 a dezembro de 2020. O escopo e as configurações para os três cenários estudados podem ser observados na Figura 1. A definição da unidade funcional considerou 2,9 m³ semanais, tendo os materiais sido calculados proporcionalmente para garantir uniformidade nas vazões de entrada nas diferentes unidades do sistema. Três cenários foram estudados:

- Cenário 1: UASB/BFA + WCF + WCFV/CCM + FLR com uso de energia elétrica;
- Cenário 2: Escoamento por gravidade também para o sistema UASB/BFA + WCF + WCFV/CCM + FLR;
- Cenário 3: substituição de materiais dos Cenários 1 e 2, os quais são detalhados nos Resultados e Discussão.

Na pesquisa conduzida por Colares *et al.* (2021), as vazões de entrada diminuem conforme as dimensões/volume útil de cada etapa. Neste inventário de ciclo de vida (ICV), os dados foram ajustados proporcionalmente para garantir uma vazão uniforme ao longo do sistema.

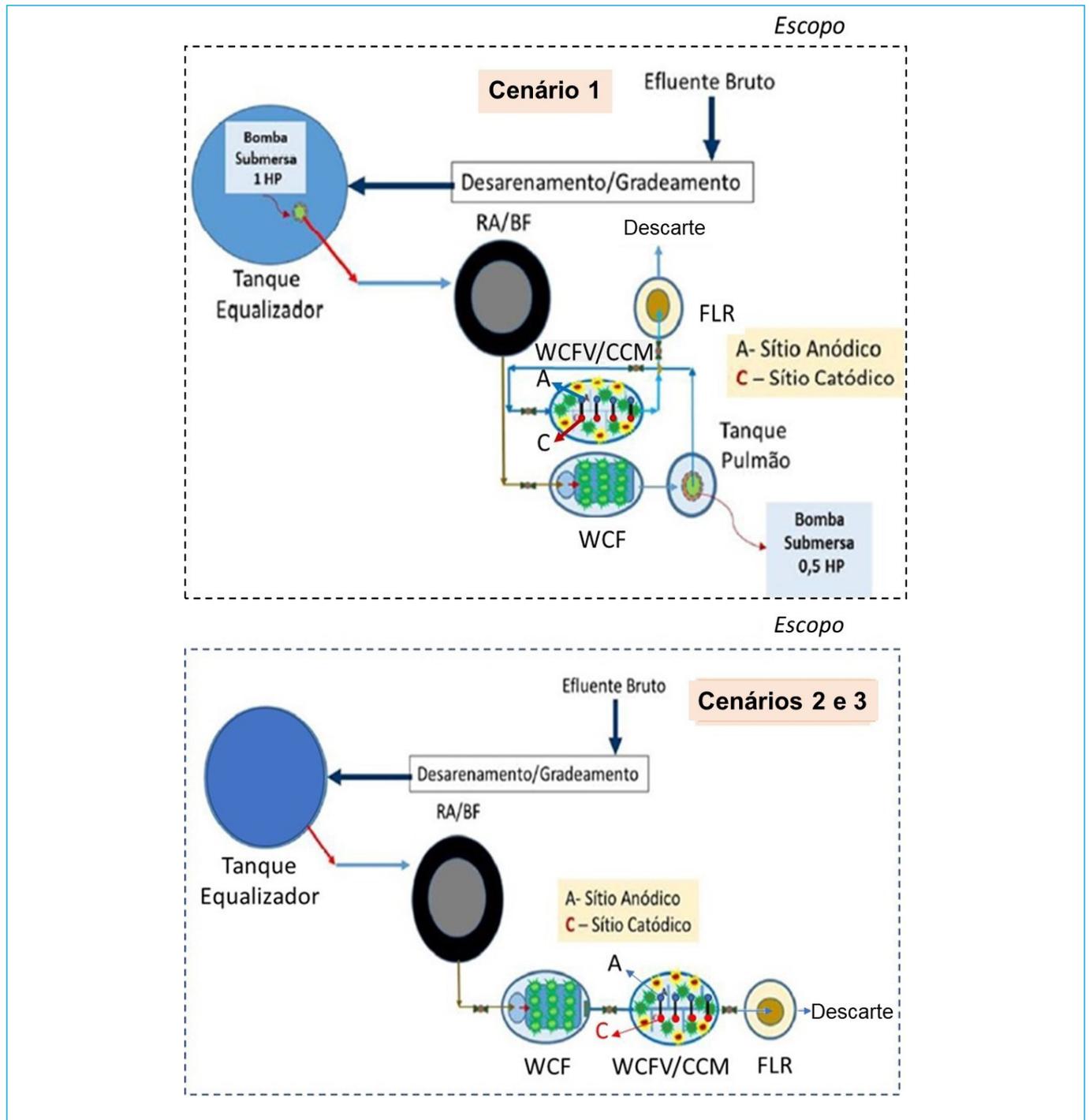


Figura 1 – Cenários para estudos de ACV – impactos ambientais nas configurações UASB/biofiltro anaeróbio - UASB/BFA (*Bakof Tec Multibiodigestor*) + wetland construído do tipo floating – WCF + tanque pulmão + wetland construído fluxo vertical-célula de combustível microbiana – WCFV/CCM + filtro misto com suporte reativo – FLR (Cenário 1 – uso de energia elétrica) e UASB/BFA + WCF + WCFV/CCM + FLR (Cenário 2 – escoamento por gravidade). Cenário 3 – substituição de materiais dos Cenários 1 e 2, os quais são detalhados nos Resultados e Discussões. Dados de configurações provenientes dos sistemas desenvolvidos por Colares *et al.* (2021). Cenários dos wetlands construídos com as macrofitas *Canna generalis*, *Chrysopogon zizanioides*, *Cyperus papyrus* *Nanus*, *Hymenachne grumosa* e *Equisetum hyemale*.

No Cenário 1, foi considerado um consumo de energia para o sistema de 18 minutos (primeira bomba) e 36 minutos (segunda bomba, para recirculação) por dia de operação das bombas centrífugas. Esses períodos envolvem, respectivamente, os pulsos de carga para as bombas de 1HP e 0,5HP, relacionados especificamente com a carga do sistema anaeróbio

para a primeira bomba e com a unidade WCFV/CCM para a segunda. Nos Cenários 2 e 3, esses elementos não foram considerados para a recirculação (36 minutos).

Quanto ao Cenário 3, é importante destacar que, no inventário hipotético, foi realizada a substituição do polietileno de alta densidade (PEAD) por uma

alternativa de polietileno reciclado. Além dessa substituição, também foi proposta a troca dos tanques de fibra de vidro reforçada com poliéster por tanques de igual dimensão fabricados em fibrocimento.

Análise de ciclo de vida para construção e operação de tratamento

A aplicação da ACV foi conduzida considerando um período de referência de 20 anos, com base na vida útil do sistema de tratamento e em pesquisas desenvolvidas por Garfi, Flores e Ferrer (2017). Aspectos de inventário (ICV) também foram considerados a partir dos estudos de Awad, Alalm e El-Etriby (2019). A unidade funcional foi definida como 2.900 litros de água residual bruta tratada por semana, correspondendo à quantidade de água tratada pelo sistema combinado durante o monitoramento. Os procedimentos metodológicos seguiram as normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): NBR 14044 (2009b) — Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida — Princípios e Estrutura — e NBR ISO 14040 (2009a) — Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida — Requisitos e Orientações.

Para a ACV, o *software* utilizado foi o SimaPro, versão 8.5.0, e o banco de dados empregado foi o Ecoinvent 3.1, com o método Impact 2002+ do Swiss Federal Institute of Technology. Foram considerados dados relativos à caracterização, normalização e pontuação única.

O método de avaliação Impact 2002+ vincula todos os tipos de resultados de inventário do ciclo de vida por meio de vários níveis médios para diferentes categorias de danos (VARANDA; PINTO; MARTINS, 2011). Os impactos ambientais foram avaliados de acordo com 15 indicadores distintos: cancerígeno (CA), não cancerígeno (NCA), inaláveis inorgânicos (RI), radiação ionizante (IR), depleção da camada de ozônio (DO), inaláveis orgânicos (RO), ecotoxicidade aquática (EA), ecotoxicidade terrestre (ET), acidez terrestre (AT), ocupação do solo (OS), acidificação aquática (AA), eutrofização aquática (EAQ), aquecimento global (AG), energia não renovável (ENR) e extração mineral (EM) (MUÑOZ *et al.*, 2006).

As fórmulas de cálculo para as emissões de metano biogênico e óxido de dinitrogênio foram adotadas com base nos estudos de Mander *et al.* (2014). Os valores de DQO foram relacionados com COT usando a expressão $COD/TOC = 2,66$ (ECKENFELDER, 1989).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização dos dados para o inventário de ciclo de vida

Para o ICV da construção e operação do sistema combinado, um resumo das entradas e saídas é apresentado nas Tabelas 1 e 2. Cabe destacar, nesta etapa do ICV, que o desempenho da ETE estudada em escala piloto atende à Resolução CONSEMA nº 355/2017. Também é possível considerar o potencial reúso dos efluentes (CONSEMA nº 419/2020), o que, até o momento, ainda não foi contemplado nos dois cenários.

Análise de ciclo de vida das unidades dos Cenários 1 e 2

A análise de rede dos Cenários 1 e 2 evidencia as diferenças significativas entre as contribuições dos materiais e a operação dos sistemas, que foram operados e configurados para o tratamento de efluentes urbanos (Figuras 2 e 3).

Tanto no Cenário 1 quanto no Cenário 2 podem ser observadas as desproporções no peso dos impactos ambientais, indicando eficiências na seleção dos materiais de construção, assim como um aumento no tempo de vida útil.

O reúso da água residuária tratada, assim como a recuperação de energia, teria um impacto significativo na redução dos impactos ambientais dos materiais utilizados na construção da ETE. Isso pode ser observado nos estudos de Awad, Alalm e El-Etriby (2019), nos quais a contribuição dos materiais de construção da ETE é menor do que os impactos associados à operação. Portanto, para as avaliações de caracterização, normalização e ponderação (Figuras 4, 5 e 6), o foco será dado ao Cenário 2, que elimina a demanda de energia do processo, aproximando-se assim de uma maior sustentabilidade para uma unidade descentralizada de tratamento.

Pode-se observar, na Figura 4, que a eutrofização aquática, o aquecimento global e os orgânicos respiráveis são os pontos mais críticos em relação à poluição causada pela ação dos efluentes, enquanto o restante está mais associado aos materiais utilizados na construção da ETE. No que diz respeito aos orgânicos respiráveis, a produção de resinas de poliéster para a fabricação dos tanques com fibra de vidro é a principal contribuidora nessa categoria de impacto. Em relação ao aquecimento global, a produção da fibra de vidro reforçada com poliéster também é a principal causadora, o que pode ser atribuído à demanda de energia necessária para os processos convencionais de fabricação de seus componentes. Além disso, a produção de polietileno e PVC também tem uma

Tabela 1 - Processamento — tratamento dos efluentes — valores em kg para fluxo de referência* de 3.016 m³. Cenários 1, 2 e 3.

Etapas do tratamento → Parâmetros inventariados ↓	Efluente bruto	UASB/BFA	WCF	WCFV/CCM	FLR	Parâmetros associados no Ecoinvent 3.1
Efluentes líquidos						
DQO	1685 ± 790,2	953,1 ± 585,1	726,9 ± 506,7	594,2 ± 470	594,2 ± 554,9	COD
DBO ₅	702,7 ± 211,7	313 ± 212	207,1 ± 123,4	173,4 ± 143,6	126,4 ± 115,2	BOD ₅
Fósforo total	20,1 ± 10	19,6 ± 6,7	17,6 ± 7,8	11,9 ± 2,1	2,6 ± 2,1	Phosphorus total
Íon NH ₄ ⁺	212 ± 55,4	210,8 ± 52,7	180,7 ± 47,4	90,2 ± 32,0	14,5 ± 18,6	Ammonium ion
Nitrogênio total	246,1 ± 50,5	213,2 ± 54,5	212,1 ± 32,5	134,8 ± 15,5	77,20 ± 14,12	Nitrogen total
Efluentes atmosféricos						
Metano	70,1	40,41	28,42	25,56	25,57	Methane, biogenic
Monóxido de dinitrogênio	0,26	0,22	0,22	0,14	0,087	Dinitrogen, monoxide

*Valores obtidos considerando-se a massa contida na concentração em mg L⁻¹ × o volume total do fluxo de referência de 3.016 m³.

Tabela 2 - Materiais: tratamento dos efluentes. Valores em kg para fluxo de referência* de 3.016 m³. Cenários 1, 2 e 3.

Etapas do Tratamento → Parâmetros Inventariados ↓	Efluente Bruto	UASB /BFA	WCF	WCFV/ CCM	FLR	Parâmetros Associado no Ecoinvent 3.1
PVC tubos	4	6		16,6	58	<i>Polyvinylchloride resin (E-PVC), emulsion polymerisation, production mix, at plant RER</i>
Fibrocimento			476,4	952	1.270	<i>Asbestos, crysolite type {GLO} production Conseq, U</i>
PEAD		110	29		580	<i>Polyethylene, high density, granulate (PE-HD) production mix, at plant RER</i>
PEAD Reciclado		110	29			<i>Polyethylene, high density, granulate, recycled (Row) market for Conseq, U</i>
Brita Fina			0,2	14.914,3	870	<i>Gravel, crushed {Row} production Conseq, U</i>
Argila Expandida			82		72,5	<i>Expanded clay {Row} production Conseq, U</i>
Poliuretano			4,1			<i>Polyurethane, flexible foam {Row} production Conseq, U</i>
Grafite			4,1	0,2		<i>Graphite {RER} production Conseq, U</i>
Fibra de Vidro			217,6	436		<i>Glass fiber reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {Row} production Conseq, U</i>
Brita				14.914,3	870	<i>Gravel, round {GLO} market for Conseq, U</i>
Aço 306				0,8		<i>Steel, chromium Steel 18/8 {RER} steel production, chromium steel 18/8 Conseq, U</i>
Areia Fina					4.350	<i>Sand {Row} gravel and quarry operation Conseq, U</i>
Energia (MJ)		1686,8		1686,8		<i>Electricity, low voltage {BR}, Market for, Conseq, U</i>

*Valores obtidos considerando-se a massa contida ou associada em cada material ou fluxo de energia para tratar volume total do fluxo de referência de 3.016 m³.

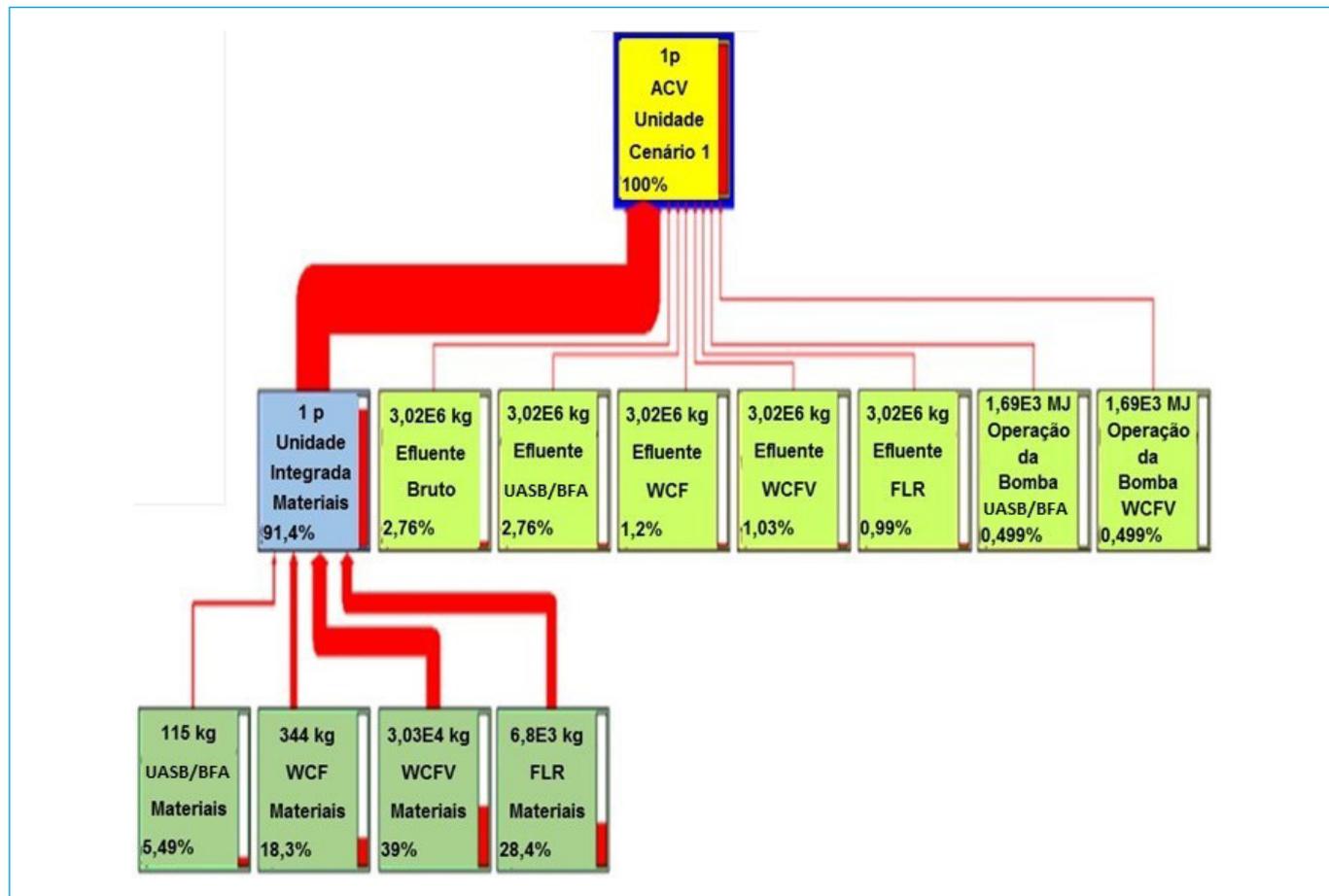


Figura 2 - Análise de rede para o Cenário 1. Ponto de corte 0,4%. Unidade funcional 2,9 m³ de efluente tratado, com fluxo de referência de 3.016 m³ em 20 anos. WCFV ° WCFV/CCM.

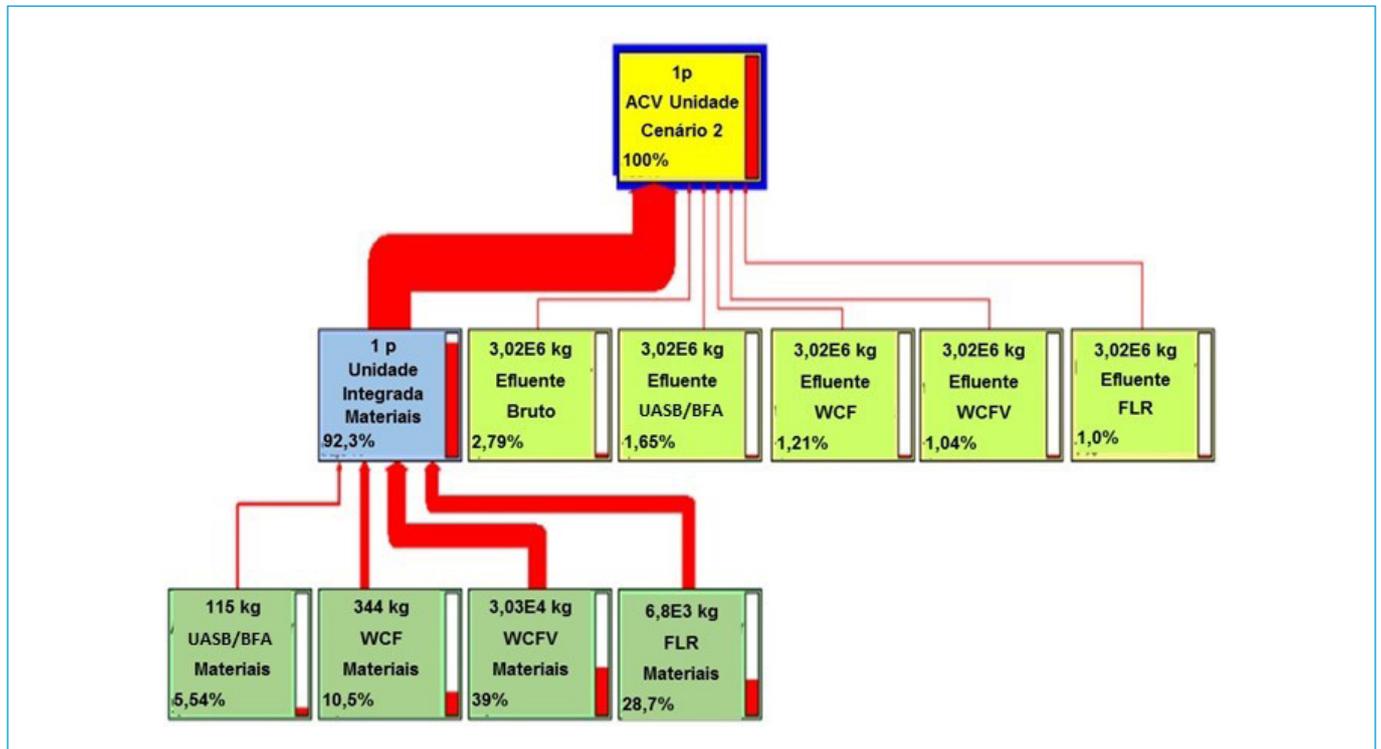


Figura 3 - Análise de rede para o Cenário 2. Ponto de corte 1,5. Unidade funcional 2,9 m³ de efluente tratado, com fluxo de referência de 3.016 m³ em 20 anos. WCFV o WCFV/CCM.

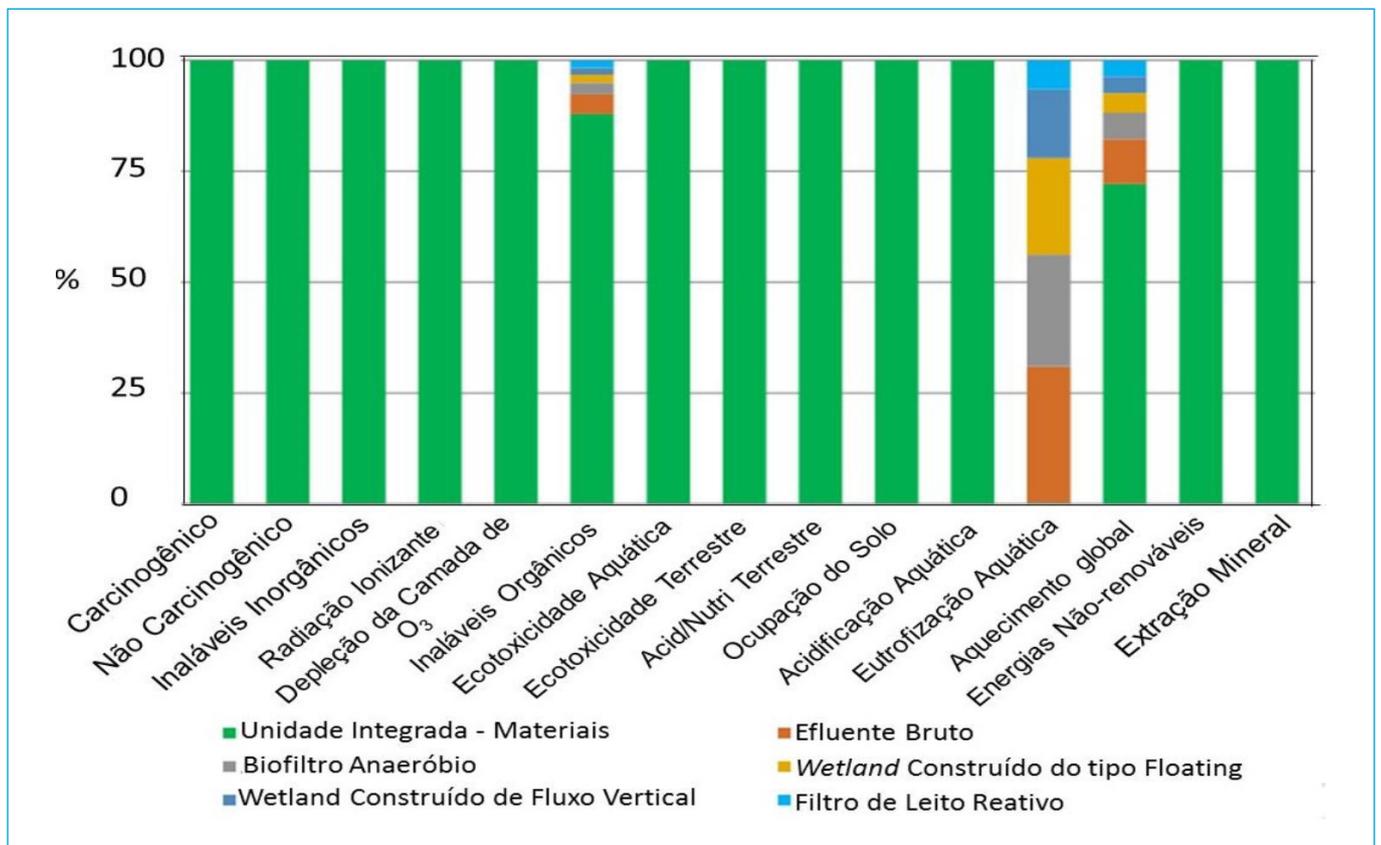


Figura 4 - Caracterização do Cenário 2. Unidade funcional 2,9 m³ de efluente tratado, com fluxo de referência de 3.016 m³ em 20 anos.

participação significativa na emissão de gases de efeito estufa. Por fim, em relação à eutrofização aquática, a maior contribuição vem dos processos da etapa de operação, o que é justificado pelo fato de que o efluente, mesmo após o tratamento, ainda contém uma quantidade residual de substâncias eutrofizantes.

A unidade estudada foi concebida com um perfil de materiais que pode ser consideravelmente melhorado para reduzir o impacto ambiental, especialmente por meio da utilização de tanques de fibrocimento ou de construção com cimento, tijolos, brita, seixos e aço (CHEN *et al.*, 2020). No entanto, inventários mais completos (ICV) podem ampliar a compreensão dos impactos ambientais nos efluentes, especialmente em relação a poluentes orgânicos (TAKESHITA; FARZANEH; DASHTI, 2020).

Por outro lado, na Figura 5, são destacados os impactos prioritários para melhorar o controle dos impactos ambientais negativos na ACV ambiental referente ao Cenário 2. A influência dos não carcinogênicos, do aquecimento global, das energias não renováveis, dos respiratórios inorgânicos e da ecotoxicidade terrestre se sobressai como os principais pontos de preocupação para a sustentabilidade.

Os impactos não carcinogênicos estão associados à contribuição do processo de Normalização, especificamente à produção de *Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up* {RoW} | production | Conseq. U. Por outro lado, o aquecimento global é influenciado pela etapa do efluente bruto (materiais e parâmetros poluentes), com 10,1% das emissões relacionadas a 578 kgCO₂ eq.

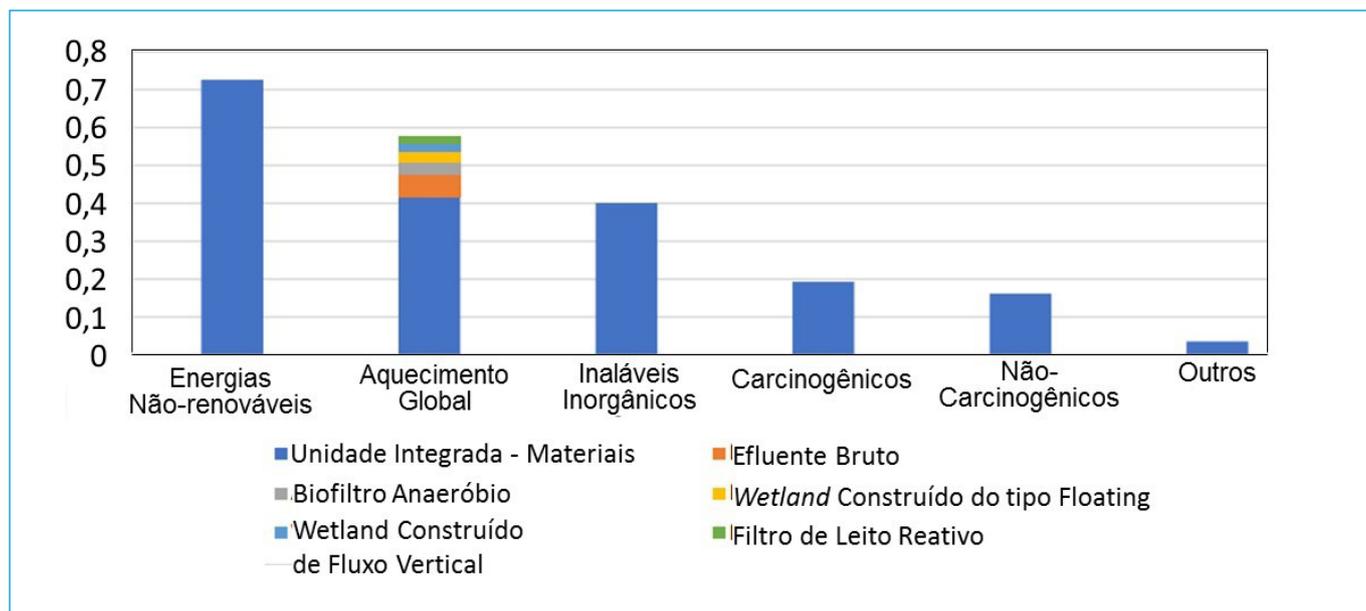


Figura 5 - Normalização do Cenário 2. Unidade funcional 2 m³ de efluente tratado, com Fluxo de Referência de 3.016 m³ em 20 anos.

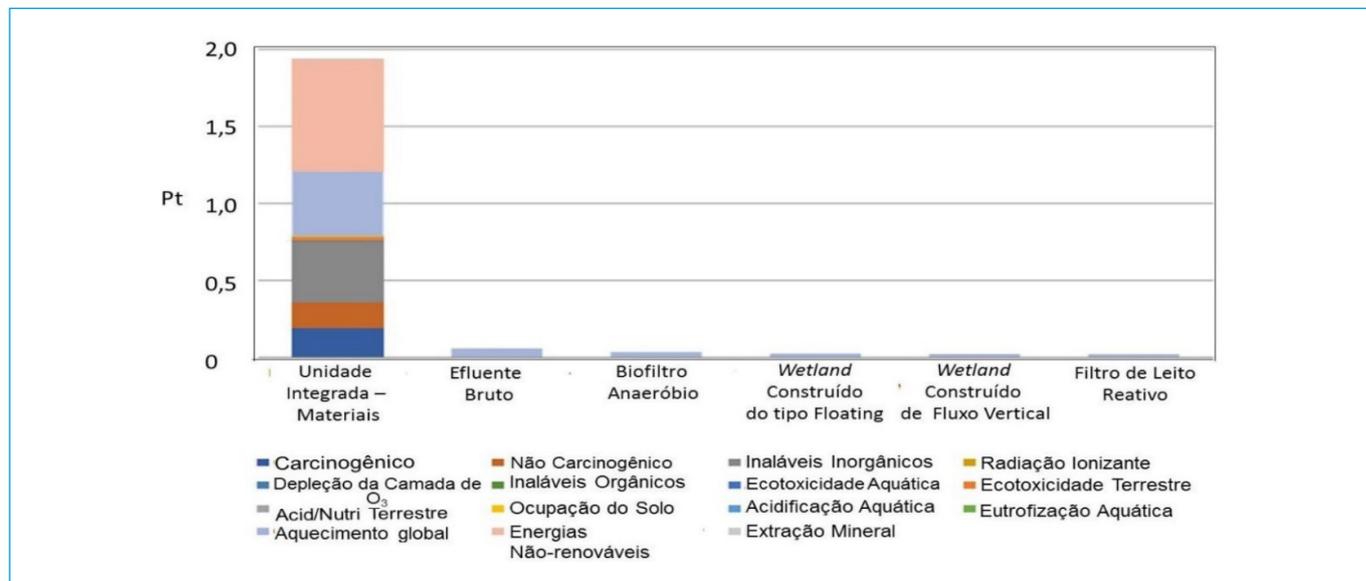


Figura 6 - Pontuação Única do Cenário 2. Unidade funcional 2 m³ de efluente tratado, com fluxo de referência de 3.016 m³ em 20 anos.

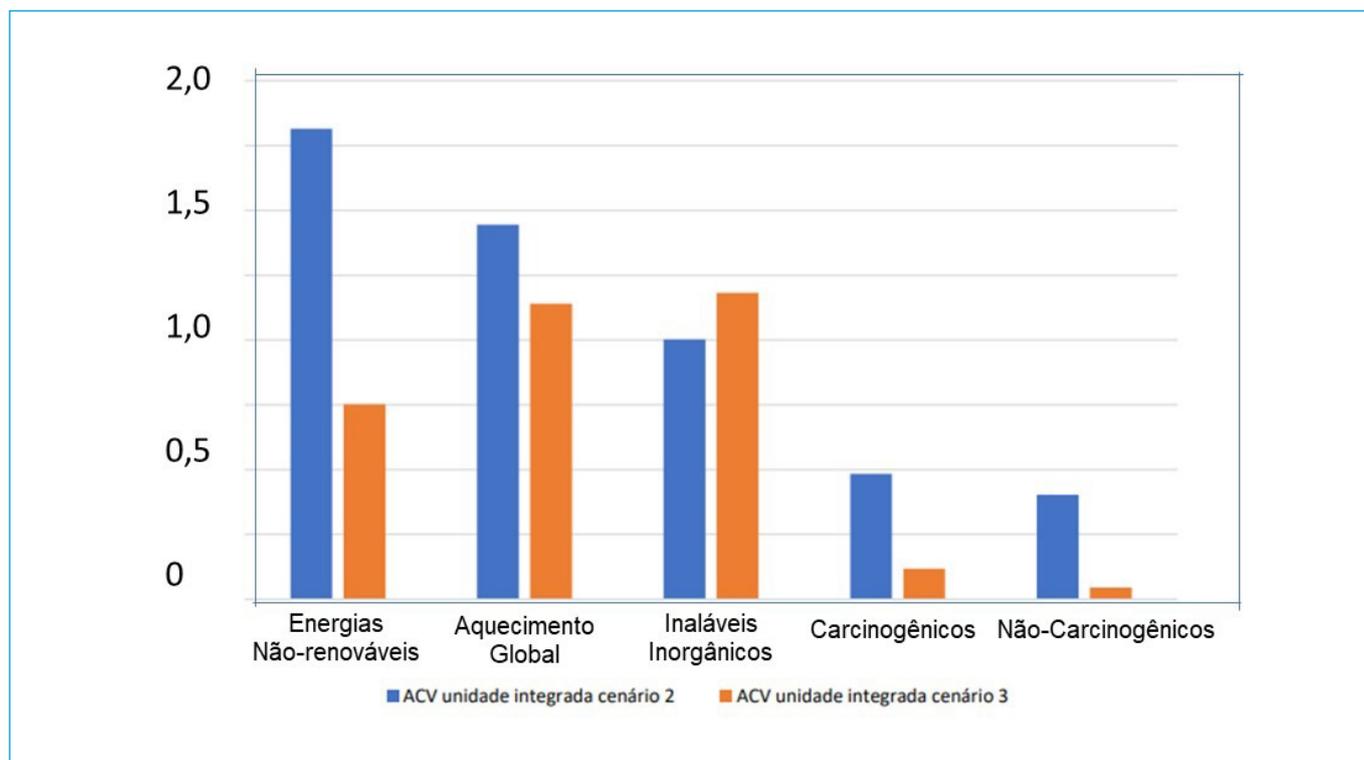


Figura 7 - Gráfico de normalização comparativo entre o Cenário 2 e o Cenário 3, proposto com alterações de materiais.

Na Figura 6, mais de 50% das contribuições para impactos negativos estão relacionadas ao *Polyvinylchloride resin* (E-PVC), *emulsion polymerisation, production mix, at plant RER* (42,4%) e *Polyethylene high density granulate* (PE-HD), *production mix, at plant RER* (9,51%). Nesse sentido, a adoção de materiais que possam substituir esses componentes tornaria o processo menos impactante. A quantidade de energia gerada pela unidade WCFV/CCM ainda não pode ser considerada significativa para o inventário, uma vez que o sistema gerou 0.325 mW/m², conforme os dados de Colares et al. (2021).

No estudo de Corbella, Puigagut e Garfí (2017), foi avaliado o impacto ambiental da implementação de células de combustível microbianas em *wetlands* construídos. Os autores utilizaram a Análise do Ciclo de Vida em três cenários, sendo um com um sistema de *wetlands* convencional e os outros dois com células de combustível microbianas, um deles usando ânodo de cascalho e malha de aço, e o outro com ânodo de grafite. Os resultados indicaram que o desempenho ambiental na remoção de nutrientes da água foi melhorado com o uso das células de combustível microbianas, permitindo a redução do volume útil do *wetland* em até 20% em comparação com o sistema sem CCM. Entretanto, uma análise econômica revelou que a implementação das células de combustível microbianas poderia aumentar os custos da fase de construção em até 1,5 vez. Os autores destacam a necessidade de estudos futuros considerando sistemas em escala maior, bem como a avaliação de alternativas de materiais mais econômicos no projeto dos sistemas.

Cabe destacar na Figura 6 que o valor de maior impacto do efluente bruto, associado ao processo de tratamento, está relacionado às emissões atmosféricas, incluindo metano biogênico e óxido de dinitrogênio. O efeito do processo de tratamento reduz os danos ambientais e pode ainda ser relacionado com futuros impactos positivos, se os dados de uso do biogás gerado pelos processos

anaeróbios forem considerados no item “Saídas conhecidas para esfera tecnológica. Produtos evitados”.

Análise de ciclo de vida da unidade com propostas de alteração

Tendo em vista os resultados dos Cenários 1 e 2, elaborou-se um Cenário alternativo (Cenário 3) que incorpora alterações com o objetivo de reduzir os impactos ambientais do sistema. Os resultados apresentados aqui levaram em consideração a substituição do polietileno de alta densidade (PEAD), identificado na base de dados EcoInvent 3.1 como *Polyethylene, high density, granulate* {RoW} | *production* | *Conseq, U*, por uma alternativa de polietileno reciclado, identificado na mesma base de dados como *Polyethylene, high density, granulate, recycled* {RoW} | *polyethylene, high density, granulate, recycled to generic market for high density PE granulate* | *Conseq, U*. Além dessa substituição, também foi proposta a substituição dos tanques de fibra de vidro reforçada com poliéster (*Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up* {RoW} | *production* | *Conseq, U* no EcoInvent) por tanques de iguais dimensões fabricados em fibrocimento, material que foi aproximado pelo *Fibre cement corrugated slab* {RoW} | *production* | *Conseq, U* na base Ecoinvent. Lutterbeck et al. (2017) estudaram o desempenho ambiental de um sistema de tratamento de efluentes projetado para atender famílias em zonas rurais. Esse sistema incluía um reator do tipo UASB feito de fibra de vidro e *wetlands* construídos no solo com geomembranas. Os autores constataram que esse reator respondia por 36% do impacto ambiental total causado pelo sistema, principalmente devido ao seu material de construção. Apesar disso, os autores destacam que esse material apresenta características interessantes, como leveza, rigidez física e boa resistência química.

Na Figura 7, pode-se observar a comparação entre os impactos causados pelos Cenários 2 e 3. Considerando que as principais categorias de impacto

foram aquecimento global, uso de energias não-renováveis, emissões de inorgânicos respiráveis, carcinogênicos e não carcinogênicos, fica evidente o ganho na redução dos impactos na maioria das categorias. Quanto ao uso de energia, a redução foi de 58,6%, o que provavelmente se deve à menor demanda energética na produção dos tanques em fibra de vidro em comparação com os de fibrocimento, além do uso de polietileno reciclado. Outra redução notável foi na emissão de carcinogênicos, que atingiu 80%. Já na categoria de inorgânicos respiráveis, houve um aumento de 18% do cenário 2 para o 3, explicado possivelmente pelo fato de que a produção do fibrocimento está associada à emissão de minerais particulados.

No trabalho de Resende, Nolasco e Pacca (2019), foram analisados dois sistemas de *wetlands* com base em experimentos em escala piloto. Os autores constataram que a etapa de construção poderia ser responsável por mais de 80% dos impactos em certas categorias, mas a substituição dos tanques de fibra de vidro por estruturas em alvenaria poderia reduzir esses impactos entre 50 e 80% nas categorias de toxicidade humana e mudança climática, respectivamente. Resende, Nolasco e Pacca (2019) realizaram também a Análise de Custo do Ciclo de Vida desses sistemas e concluíram que a substituição dos tanques de fibra de vidro reforçada com poliéster por estruturas comparáveis construídas em alvenaria (tijolos e concreto reforçado em aço), além de trazer benefícios ambientais, também seria vantajosa do ponto de vista econômico.

CONCLUSÃO

O Cenário 3 se destacou como a melhor configuração para a redução dos impactos ambientais no contexto do saneamento em modelo unifamiliar. Foi possível constatar que as configurações dos sistemas de tratamento de efluentes estão associadas a impactos ambientais que não seriam compensados pelos danos causados pelos materiais utilizados na construção da ETE, especialmente os materiais de matriz petroquímica (como no caso do sistema UASB/BFA). Por meio do estudo de substituição de alguns materiais,

tornou-se evidente que medidas relativamente simples podem resultar em uma redução significativa dos impactos ambientais na etapa de construção (como a eliminação da unidade de recirculação, ao passar do Cenário 1 para o Cenário 2). No entanto, estudos subsequentes são essenciais para uma avaliação mais aprofundada dos aspectos ambientais, econômicos e sociais dessas alterações (por exemplo, a substituição por materiais em alvenaria ou a utilização de polietileno de alta densidade — PEAD reciclado). Sugere-se explorar outras medidas para melhorar a sustentabilidade do sistema, tais como aumentar as possibilidades de geração de energia na etapa anaeróbica, viabilizar o reúso da água, aproveitar a biomassa dos *wetlands* construídos para a produção de biocombustíveis (que também devem ser incluídos na avaliação de ciclo de vida); eliminar a demanda de energia elétrica para processos de recirculação ou carga do sistema ETE. Essas considerações podem ser ponderadas para prosseguir com os estudos de ACV ambiental. Além disso, é recomendável pensar em incluir análises de ciclo de vida ambiental (ACV-E) e social (ACV-S) para uma abordagem mais completa das pesquisas, especialmente considerando o uso do PSILCA e combinando com planilhas no formato do modelo 5W2H, a fim de destacar ações de prognóstico e planejamento.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Sosa, E.E.: Conceituação, Investigação, Metodologia, Validação, Visualização, Escrita – primeira redação, Escrita – revisão e edição. Machado, E.L.L.: Curadoria de Dados, Obtenção de financiamento, Investigação, Metodologia, Administração do projeto, Recursos, Software, Supervisão, Validação, Visualização, Escrita – primeira redação, Escrita – revisão e edição. Colares, G.S.: Análise formal, Investigação, Validação, Visualização, Escrita – primeira redação, Escrita – revisão e edição. Conrad, I.R.: Validação, Visualização. Kroth, G.C.: Validação, Visualização. Rodriguez, A.L.: Validação, Visualização. Mesacasa, L.: Validação, Visualização. Fochi, A.T.: Validação, Visualização. Teixeira, D.B.: Validação, Visualização. Oliveira, F.: Validação, Visualização.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR ISO 14040*: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Brasil: ABNT, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR ISO 14044*: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Brasil: ABNT, 2009b.

AWAD, H.; ALALM, M.G.; EL-ETRIBY, H.K. Environmental and cost life cycle assessment of different alternatives for improvement of wastewater treatment plants in developing countries. *Science of the Total Environment*, v. 660, p. 57-68, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.386>

CHEN, K.-H.; WANG, H.-C.; HAN, J.-L.; LIU, W.-Z.; CHENG, H.-Y.; LIANG, B.; WANG, A.-J. The application of footprints for assessing the sustainability of wastewater treatment plants: a review. *Journal of Cleaner Production*, v. 277, 124053, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124053>

COLARES, G.S.; DELL'OSBEL, N.; PARANHOS, G.; CERENTINI, P.; OLIVEIRA G.A.; SILVEIRA, E.; RODRIGUES, L.R.; SOARES, J.; LUTTERBECK, C.A.; RODRIGUEZ, A.L.; VYMAZAL, J.; MACHADO, E.L. Hybrid constructed wetlands integrated with microbial fuel cells and reactive bed filter for wastewater treatment and bioelectricity generation. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, p. 22223-22236, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17395-5>

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE DE SANTA CATARINA (CONSEMA). *Resolução nº 355*. Fornece critérios e padrões para a emissão de efluentes líquidos para fontes geradoras que descarregar seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. CONSEMA, 2017.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE DE SANTA CATARINA (CONSEMA). *Resolução nº 419*. Estabelece critérios e procedimentos para a utilização de água de reuso para fins urbanos, industriais, agrícolas e florestais no Estado do Rio Grande do Sul. CONSEMA, 2020.

CORBELLA, C.; PUIGAGUT, J.; GARFÍ, M. Life cycle assessment of constructed wetland systems for wastewater treatment coupled with microbial fuel cells. *Science of the Total Environment*, v. 584-585, p. 355-362, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.186>

GARFÍ, M.; FLORES, L.; FERRER, I. Life cycle assessment of wastewater treatment systems for small 841 communities: activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds. *Journal Cleaner Production*, v. 161, p. 211-219, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.116>

LUTTERBECK, C.A.; KIST, L.T.; LOPEZ, D.R.; ZERWES, F.V.; MACHADO, Ê.L. Life cycle assessment of integrated wastewater treatment systems with constructed wetlands in rural areas. *Journal of Cleaner Production*, v. 148, p. 527-536, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.024>

MANDER, Ü.; DOTRO, G.; EBIE, Y.; TOWPRAYOON, S.; CHIEMCHAISRI, C.; NOGUEIRA, S.F.; JAMSRANJAV, B.; KASAK, K.; TRUJ, J.; TOURNEBIZE, J.; MITSCH, W.J. Greenhouse gas emission in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*, v. 66, p. 19-35, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.006>

MUÑOZ, I.; PERAL, J.; ANTONIO AYLLON, J.; MALATO, S.; PASSARINHO, P.; DOMÈNECH, X. Life cycle assessment of a coupled solar 886 photocatalytic-

biological process for wastewater treatment. *Water Research*, 40, n. 19, p. 3533-3540, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.08.001>

OMRAN, II.; AL-SAATI, N.H.; AL-SAATI, H.H.; HASHIM, K.S.; AL-SAATI, Z.N. Sustainability assessment of wastewater treatment techniques in urban areas of Iraq using multi-criteria decision analysis (MCDA). *Water Practice and Technology*, v. 16, n. 2, p. 648-660, 2021. <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.013>

RESENDE, J.D.; NOLASCO, M.A.; PACCA, S.A. Life cycle assessment and costing of wastewater treatment systems coupled to constructed wetlands. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 148, p. 170-177, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.034>

SALVADOR, R.; FRANCISCO, A.; PIEKARSKI, C.; LUZ, L. Life cycle assessment (LCA) as a tool for business strategy. *Independent Journal of Management & Production*, v. 5, n. 3, p. 733-751, 2014. <https://doi.org/10.14807/ijmp.v5i3.186>

SERRELI, M.; PETTI, L.; RAGGI, A.; SIMBOLI, A.; IULIANO, G. Social life cycle assessment of an innovative industrial wastewater treatment plant. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 26, p. 1878-1899, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01942-w>

TAKESHITA, S.; FARZANEH, H.; DASHTI, M. Life-Cycle Assessment of the Wastewater Treatment Technologies in Indonesia's Fish-Processing Industry. *Energies*, v. 13, n. 24, p. 6591, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13246591>

VARANDA, M.G.; PINTO, G.; MARTINS, F. Life cycle analysis of biodiesel production. *Fuel Processing Technology*, 92, n. 5, p. 1087-1094, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.01.003>

YU, H.-Q.; WANG, H. *China's sustainable Concept wastewater treatment plant progress*. International Water Association. Disponível em: <https://www.thesourcemagazine.org/chinas-sustainable-concept-wastewatertreatment-plant-progress/>. Acesso em: 20 dez. 2021.

