



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CAMPUS I  
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**ARIEL MORAIS JUNIOR**

**AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DO CICLO DE VIDA DE REATORES UASB  
TRATANDO ESGOTOS SANITÁRIOS**

**Campina Grande – PB**

**2021**

**ARIEL MORAIS JUNIOR**

**AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DO CICLO DE VIDA DE REATORES UASB  
TRATANDO ESGOTOS SANITÁRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Rui de Oliveira.

**Campina Grande – PB**

**2021**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

M827a Morais Junior, Ariel.

Avaliação de impactos do ciclo de vida de reatores UASB tratando esgotos sanitários [manuscrito] / Ariel Morais Junior. - 2021.

36 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia , 2021.

"Orientação : Prof. Dr. Rui de Oliveira , Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."

1. ACV. 2. UASB. 3. Aquecimento global. 4. Eutrofização.

I. Título

21. ed. CDD 628.35

**ARIEL MORAIS JUNIOR**

**AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DO CICLO DE VIDA DE REATORES UASB  
TRATANDO ESGOTOS SANITÁRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Aprovado em: 30/09/2021.

**BANCA EXAMINADORA**



---

Prof. Dr. Rui de Oliveira.  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)  
Orientador



---

Profa. Dra. Ruth Silveira do Nascimento  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)  
Examinadora Interna

Juscelino Alves

Henriques:06751456433

Assinado de forma digital por  
Juscelino Alves

Henriques:06751456433

Dados: 2021.10.14 10:30:25 -03'00'

---

Prof. Dr. Juscelino Alves Henriques  
Instituto Federal do Sertão Pernambucano (IFSertãoPE)  
Examinador Externo

*Ao meu Deus, à minha família, dedico este trabalho.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar, Ele que nunca desistiu de mim e sempre me mostrou nos momentos mais difíceis que Ele estava comigo.

À minha família, em especial a minha mãe, Dona Vera, que sempre acreditou no meu potencial e nunca mediu esforços para que eu pudesse realizar as minhas conquistas.

À minha noiva, Yanca Virgínia, que esteve sempre comigo, principalmente nessa fase final de curso, sendo sempre a maior incentivadora para conclusão com excelência dessa etapa. Agradeço por todo amor, compreensão e carinho.

Ao professor Rui de Oliveira, que sempre foi referência para mim de pessoa e pesquisador. Agradeço por toda confiança, contribuição e dedicação para me ajudar na formação acadêmica.

Aos professores do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da UEPB, em especial às professoras Celeide Maria Belmont Sabino Meira e Ruth Silveira do Nascimento por contribuírem de forma significativa para minha formação acadêmica e estarem sempre dispostas a mostrar tudo que a graduação poderia proporcionar.

À banca, pela disponibilidade de participar deste momento tão importante e pela dedicação e profissionalismo dos quais são referência para mim.

Aos funcionários da UEPB, pela presteza e atendimento quando nos foi necessário.

Aos meus grandes amigos da graduação Sabrina Holanda, Wilton Camelo e Amanda Raquel que quero levar para toda a vida. Compartilhamos momentos de alegria e tristeza. Agradeço por terem dividido os fardos comigo, ajudando e apoiando nos momentos difíceis que a graduação proporciona.

Aos meus amigos e conterrâneos Redy Rocha, Thiago Morais, Yara Synthia e Petra Marinho que estavam comigo antes do ingresso na Universidade e permaneceram durante todo esse tempo me apoiando e contribuindo para que eu alcançasse a meta.

Ao CNPQ e à UEPB pelo subsídio da pesquisa.

## RESUMO

O Brasil enfrenta grandes dificuldades na universalização do saneamento básico. Mesmo em localidades onde pode haver coleta e tratamento dos efluentes domésticos, ainda existem complicações relacionadas aos impactos provenientes desses sistemas. Frequentemente, a decisão sobre a escolha do método de tratamento é baseada, exclusivamente, no critério do custo de instalação deixando de lado os impactos causados pela tecnologia adotada. Uma das formas de avaliar os impactos de maneira global, é através da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). A ACV é uma metodologia de apoio à tomada de decisão capaz de avaliar os impactos ambientais causados por um processo, produto ou serviço. O objetivo deste trabalho é avaliar o ciclo de vida de um reator UASB tratando esgoto sanitário. O reator estudado pertence à Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários (EXTRABES), sob a administração da Universidade Estadual da Paraíba. A unidade funcional é de 1 m<sup>3</sup> de efluente tratado. Foi utilizado o *software SimaPro*<sup>®</sup> para realizar a Avaliação de Inventário de Ciclo de Vida (AICV). O método escolhido para caracterização foi o CML 2000. O estudo foi direcionado às categorias de impacto Aquecimento global e Eutrofização. Os resultados da análise apontaram dois pontos críticos na operação do reator, a geração e emissão do metano para a atmosfera e a elevada concentração de nutrientes no efluente final. O estudo também evidenciou a necessidade da construção de um banco de dados local robusto, que dê suporte a estudos mais aprofundados e em diferentes categorias de impacto.

**Palavras-Chave:** ACV. UASB. Aquecimento Global. Eutrofização.

## ABSTRACT

Brazil faces great difficulties in the universalization of basic sanitation. Even in places where there can be collection and treatment of domestic effluents, there are still complications related to acts related to these systems. Often, the decision on the choice of treatment method is based exclusively on the cost of installation not considering the impacts caused by the adopted technology. One of the ways to assess impacts globally is through the Life Cycle Assessment (LCA). LCA is a decision support methodology capable of assessing the environmental impacts caused by a process, product, or service. The objective of this work is to evaluate the life cycle of a UASB reactor treating sanitary sewage. The studied reactor belongs to an Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários (EXTRABES), under the administration of the Universidade Estadual da Paraíba. The functional unit is 1 m<sup>3</sup> of treated effluent. Use SimaPro® software to perform the Life Cycle Impact Assessment (LCIA). The method was chosen for the CML 2000 feature. The study was targeted as global warming and eutrophication impact categories. The results of the analysis pointed to two mandatory points in the reactor operation, the generation and emission of methane into the atmosphere and the high concentration of effluent nutrients. The study also highlighted the need to build a robust local database that supports more in-depth studies in different impact categories.

**Keywords:** LCA. UASB. Global Warming. Eutrophication.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Estrutura metodológica da ACV.....	17
<b>Figura 2</b> - Representação dos resultados do ICV com as categorias de impacto .....	19
<b>Figura 3</b> - Fluxograma de desenvolvimento do estudo .....	23
<b>Figura 4</b> - Estrutura e abordagem da ACV para o estudo .....	26
<b>Figura 5</b> - Fronteira do sistema.....	27
<b>Figura 6</b> - Resultado da AICV.....	31

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Resumo de trabalhos publicados aplicando ACV no tratamento de esgoto .....	22
<b>Tabela 2</b> - Características do reator UASB .....	24
<b>Tabela 3</b> - Concentração, carga e quantitativo total para os indicadores do esgoto bruto.....	24
<b>Tabela 4</b> - Concentração, carga e quantitativo total para os indicadores do efluente.....	25
<b>Tabela 5</b> - Carga e quantitativo total para indicadores de saída do reator .....	25
<b>Tabela 6</b> - Inventário de Ciclo de Vida reator UASB.....	30
<b>Tabela 7</b> - Resultado da caracterização das emissões para a categoria Eutrofização .....	32

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AICV	Análise do Inventário de Ciclo de Vida
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CML	<i>Center for Environmental Science of Leiden University</i>
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EXTRABES	Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NBR	Norma Brasileira
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PIBIC	Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica
SETAC	<i>Society for Environmental Toxicology and Chemistry</i>
SNIS	Sistema Nacional de Informação sobre o Saneamento
SST	Sólidos Suspensos Totais
STDE	Sistema de Tratamento de Esgoto Doméstico
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UEPB	Universidade Estadual da Paraíba

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVOS.....	13
2.1	Objetivo geral.....	13
2.2	Objetivos específicos.....	13
3	SANEAMENTO BÁSICO.....	14
3.1	Reator tipo UASB.....	15
4	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA.....	16
4.1	Aplicabilidade e limitações.....	20
4.2	ACV aplicada ao tratamento de esgoto.....	21
5	METODOLOGIA.....	23
5.1	Estrutura da ACV.....	25
5.1.1	Objetivo.....	26
5.1.2	Escopo da ACV.....	26
5.1.3	Metodologia de AICV e tipos de Impactos.....	27
5.1.4	Requisitos de qualidade dos dados.....	28
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
6.1	Inventário do ciclo de vida (ICV).....	29
6.2	Análise do Inventário de ciclo de vida (AICV).....	31
7	CONCLUSÃO.....	34
	REFERÊNCIAS.....	35

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil enfrenta grandes dificuldades na universalização do saneamento básico. Dados de 2017 da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) apontam que 38,6% dos esgotos sanitários produzidos no Brasil, não são coletados por sistemas coletivos de esgotamento sanitário, nem tratados. Outros 18,8% desses esgotos são coletados, mas são lançados nos corpos d'água sem tratamento.

A problemática do saneamento básico é uma das mais importantes e urgentes prioridades a serem resolvidas no Brasil. Estando ligado diretamente à saúde da população humana e à qualidade ambiental, o saneamento básico, entretanto, por muitas vezes, tem sido colocado em segundo plano pelos tomadores de decisão e do poder público.

No ano de 2007 foi instituída a Política Federal de Saneamento Básico, por meio da Lei Federal nº 11.445 (BRASIL, 2007), que trata da necessidade de propiciar condições de salubridade ambiental para toda a população, seja ela de grandes centros urbanos, ou mesmo de comunidades rurais e pequenos núcleos urbanos isolados.

Apesar de ser bem definida, no que tange à implementação da legislação, fica claro que essa ocorre de forma incipiente na maioria dos casos. Mesmo em localidades onde pode haver coleta e tratamento dos efluentes domésticos, ainda existem complicações relacionadas aos impactos provenientes desses sistemas, devido a peculiaridades e características de cada um deles.

Partindo dessa compreensão é que surge o presente trabalho de conclusão de curso, que é produto das reflexões realizadas anteriormente, oriundas da pesquisa intitulada **“AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA DE REATORES UASB TRATANDO ESGOTOS SANITÁRIOS”**, vinculada ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica - PIBIC/UEPB/CNPq, cota 2020 - 2021.

O tema da investigação está inserido nos estudos realizados pelo Grupo de Pesquisa em Saúde Ambiental do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UEPB, que promove o desenvolvimento de discussões e investigações, na Graduação e na Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, na linha de pesquisa sobre Saúde e Saneamento Ambiental.

A pesquisa se justifica na medida em que a alta eficiência (de até 70%) de remoção de matéria orgânica, o caráter compacto e o custo reduzido de reatores UASB, no tratamento de esgotos sanitários, alegados como grandes vantagens, têm sido responsáveis pela grande disseminação dessa tecnologia de tratamento de águas residuárias em muitas partes do mundo

e, particularmente, no Brasil. Frequentemente, a decisão sobre a escolha do método de tratamento é baseada, exclusivamente, no critério do custo de instalação, sendo esquecidos importantes aspectos como a má qualidade do efluente em termos das elevadas concentrações de sólidos em suspensão, indicadores fecais (coliformes termotolerantes) e nutrientes, o que, praticamente, obriga a adoção de operações unitárias de pós-tratamento para o seu lançamento em corpos receptores.

Isso, além de contrariar o, tão alegado, caráter compacto do sistema, representa um elemento complicador nos aspectos da operação e manutenção do sistema. Embora algumas unidades de maior porte contem com sistemas de captura e destinação do biogás resultante da digestão anaeróbia. Entretanto, a maioria delas, particularmente em sistemas descentralizados, emite essa mistura poluente para a atmosfera, o que, somado aos riscos do lançamento do efluente no solo e nos corpos receptores, representa significativo impacto ambiental. Torna-se, portanto, imprescindível a avaliação do impacto do ciclo de vida desses reatores, visando sua aplicação sustentável ao tratamento de águas residuárias.

Para o desenvolvimento da pesquisa partiu-se dos seguintes questionamentos: com base no seu ciclo de vida, qual o real desempenho ambiental dos reatores tipo UASB? Quais os impactos ambientais sobre a atmosfera e os corpos hídricos desse tipo de reator?

A sistematização dos resultados da citada pesquisa neste Trabalho de Conclusão de Curso, adveio do interesse em caracterizar o desempenho ambiental dos reatores UASB, na intenção de que os resultados se tornem úteis na comparação com outros tipos de tratamento de esgotos sanitários, visando contribuir na tomada de decisão sobre qual método de tratamento aplicar ao esgoto sanitário. Almeja-se, também, que os resultados sejam capazes de motivar uma reflexão sobre o real impacto desse método de tratamento.

Por fim, os resultados desta investigação deverão ser capazes de contribuir para a disseminação da discussão sobre o tema de tratamento de águas residuárias, como também, sobre a avaliação de ciclo de vida.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Caracterizar o desempenho ambiental do reator tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) no tratamento de esgotos sanitários, com base na avaliação do seu ciclo de vida (ACV).

### **2.2 Objetivos específicos**

- Quantificar os impactos ambientais do reator UASB sobre a atmosfera e corpos hídricos;
- Discutir sobre a adequação da aplicação de reatores UASB ao tratamento de águas residuárias;
- Contribuir para a inserção/consolidação de critérios ambientais de tomada de decisão sobre alternativas de tratamento de esgotos sanitários.

### 3 SANEAMENTO BÁSICO

Segundo a Lei Federal nº 14.026 de julho de 2020, o saneamento básico pode ser definido como o conjunto dos serviços, infraestrutura e instalações operacionais de abastecimento de água, limpeza urbana, drenagem urbana, manejos de resíduos sólidos, de águas pluviais e esgotamento sanitário (BRASIL, 2020).

O aumento da concentração populacional nos centros urbanos acarreta um maior consumo de água, gerando, conseqüentemente, um maior volume de esgotos sanitários que exigem uma destinação adequada para prevenir o risco de poluição do solo, contaminação dos ecossistemas aquáticos e conseqüente danos à saúde humana. Diante disso, há a necessidade urgente de se desenvolverem e adaptarem tecnologias viáveis de tratamento de águas residuárias (SOUSA, 2004).

Esgoto pode ser entendido como a água que, após seu uso diverso e sem o devido tratamento, torna-se imprópria para a maioria dos usos, podendo causar danos à saúde humana e a degradação ambiental. Por este motivo, é necessária a imediata e segura remoção de esgotos das suas fontes geradoras, seguida de tratamento para proteção da saúde e do meio ambiente.

Segundo dados de 2018 do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), 53,2% da população brasileira eram atendidos com coleta de esgoto, enquanto 46,3% possuíam tratamento de esgoto, um número bem reduzido quando comparado à cobertura de atendimento de abastecimento de água potável que atinge 83,6% dos brasileiros (BRASIL, 2018).

Processos biológicos de tratamento de esgoto, entre os quais lagoas de estabilização, lodos ativados e reatores UASB, têm sido reconhecidos como os principais processos de tratamento de águas residuárias, particularmente as de origem doméstica.

De fato, Chernicharo *et al.* (2018), traçaram um panorama do tratamento de esgoto sanitário em várias regiões do Brasil e destacaram que reatores UASB, lodos ativados e lagoas de estabilização totalizaram 90% das tecnologias mais empregadas nas estações de tratamento de esgotos. Ainda de acordo com estes autores, cerca de 40% das tecnologias utilizadas são constituídas por reatores anaeróbios, num total de 1.667 estações de tratamento.



### 3.1 Reator tipo UASB

Os reatores UASB são sistemas que utilizam digestão anaeróbia para realizar o tratamento de águas residuárias, caracterizados pelos baixos tempos de detenção hidráulica e elevados tempos de retenção celular, configuram-se como sistemas de alta taxa. Por se tratar de um reator anaeróbio, apresenta baixo crescimento celular e gera biogás, como subproduto, apresentando elevado teor de metano que pode ser utilizado como fonte de energia na própria estação de tratamento.

Segundo Chernicharo (2007), os reatores UASB, têm permitido a ampliação do atendimento à população pelo serviço de tratamento de esgoto doméstico, especialmente em países subdesenvolvidos e em desenvolvimento, a exemplo de Brasil, Colômbia, Índia, países do Oriente Médio e África, pelo fato de reunirem características favoráveis, como o baixo custo, sistema compacto e de relativa simplicidade operacional.

No entanto, os reatores UASB sozinhos dificilmente produzem efluentes que atendam os padrões de qualidade mínimos exigidos pela Resolução CONAMA 430 de 13 de maio de 2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes (BRASIL, 2011). Desta forma, torna-se de grande importância, portanto, adoção de sistemas de pós-tratamento dos efluentes destes reatores, a fim de garantir que estes venham a atingir os requisitos de qualidade necessários exigidos pela legislação e contribuir para a proteção dos corpos d'água receptores desses lançamentos.

Esse fato vai de encontro à maioria dos critérios apresentados para a escolha desse método de tratamento. Devido alguns sistemas de pós-tratamento apresentarem elevado custo de operação e maior complexidade, como é o caso do lodo ativado, que é comumente utilizado em complemento dos reatores UASB, ou mesmo, necessitarem de maiores áreas para alcançar a eficiência desejada a exemplo das lagoas de polimento e os sistemas de terras úmidas construídas (Wetlands), outros sistemas podem ser utilizados como tratamento complementar aos reatores UASB, os filtros anaeróbios, filtros aerados submersos e filtros biológicos percoladores, esses mais próximos de conservar a característica compacta do sistema.

## 4 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

A sociedade moderna se tornou mais preocupada com assuntos como a depleção de recursos naturais e os impactos ambientais de suas atividades (KALAKUL *et al.*, 2014). Os gestores públicos, empresas e a população em geral têm prestado, cada vez mais atenção às atividades que afetam o meio ambiente, indicando que a análise ambiental se tornou um fator importante para a busca por tecnologias mais sustentáveis e eficientes, cuja implementação exige elevados investimentos e rigorosa análise de desempenho ambiental.

Nessa perspectiva, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) constitui-se em metodologia aplicável à elaboração de inventários de impactos ambientais de um sistema através da contabilização de todos os fluxos de matéria e energia.

Conforme a *Society for Environmental Toxicology and Chemistry* - SETAC (2011), a ACV pode ajudar a identificar oportunidades para melhorar o desempenho ambiental dos produtos e serviços em várias fases do seu ciclo de vida: servir de ferramenta para informar os diversos tomadores de decisão, sejam eles na indústria, organizações governamentais ou não governamentais sobre os impactos potenciais atrelados ao ciclo de vida daquele produto ou serviço; auxiliando no marketing para obtenção de declaração ambiental do produto e rotulagem ecológica e na seleção de indicadores relevantes de desempenho ambiental.

A SETAC é uma organização profissional mundial sem fins lucrativos composta por cerca de 5.000 indivíduos e instituições em mais de 90 países, dedicada ao estudo, análise e solução de problemas ambientais, gestão e regulação dos recursos naturais, pesquisa e desenvolvimento e educação ambiental, sendo essa pioneira nos estudos de ACV no mundo.

A ACV é amplamente utilizada na seleção de indicadores relevantes de desempenho ambiental, incluindo as técnicas de medição, como também pode ser uma das ferramentas para declaração ambiental do produto ou serviço, com o fim de obtenção de rotulagem ecológica.

Segundo a norma técnica ABNT NBR 14.044/2009, a ACV permite a quantificação e avaliação dos aspectos ambientais e impactos potenciais, associados ao ciclo de vida de serviços, processos, atividades ou produtos e sua aplicação compreende quatro fases (BRASIL, 2009). A Figura 1 demonstra a estrutura metodológica da ACV e a relação iterativa das quatro fases que nela está contida.

**Figura 1** - Estrutura metodológica da ACV

Fonte: NBR ISO 14044/2009.

#### Fase 1: definição do objetivo e escopo

Na fase 1 busca-se definir o propósito e extensão do estudo, com estabelecimento de fronteiras, delimitando quais os processos envolvidos no ciclo de vida do objeto avaliado serão incluídos no estudo. Segundo a Norma ISO 14.040 (ABNT, 2009a), o escopo de uma ACV, incluindo a fronteira do sistema e o nível de detalhamento, depende do objeto e do uso pretendido para o estudo.

O objetivo de uma ACV deve atender os requisitos mínimos estabelecidos pela ABNT NBR ISO 14.044 de 2009, que são: declarar a aplicação pretendida com aquela avaliação, bem como, as razões que motivaram a execução do estudo, o público-alvo, e se existe a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente.

Quanto ao escopo, devem ser considerados e descritos de forma clara os seguintes itens: as funções do sistema de produto ou, no caso de estudos comparativos, os sistemas; a unidade funcional; o sistema de produto a ser estudado; os limites do sistema de produto; os procedimentos de alocação; as categorias de impacto e metodologias de análise de impacto e subsequente interpretação a ser utilizada; requisitos dos dados; pressupostos; limitações; requisitos iniciais de qualidade dos dados; tipo de revisão crítica, se necessário; tipo e formato do relatório requerido para o estudo. Entretanto, devido à natureza iterativa da ACV, o escopo pode ter que ser ajustado durante o estudo por três motivos principais: devido limitações não previstas; restrições encontradas ou como resultado de informações adicionais advinda de outras fases, caso isso venha a acontecer, esses ajustes em conjunto com suas justificativas sejam documentados.

### Fase 2: análise do inventário do ciclo de vida

A fase 2 envolve a coleta de dados referentes ao sistema de produto estudado, a quantificação das entradas e saídas relevantes na fronteira do sistema. Para análise do inventário, devem ser coletados os dados qualitativos e quantitativos para cada processo unitário que esteja incluído dentro dos limites do sistema (ABNT, 2009b).

A Norma ABNT NBR ISO 14.044 de 2009 sugere a adoção de medidas que assegurem o entendimento uniforme e consistente dos sistemas, tais como o desenho de fluxogramas gerais dos processos e a listagem de fluxos e de dados relevantes para as condições de operação associadas a cada processo elementar e das unidades utilizadas.

### Fase 3: avaliação do impacto do ciclo de vida

A fase 3 é, propriamente dita, a avaliação do impacto de ciclo de vida (AICV) que difere de outras técnicas, tais como a avaliação de impacto ambiental ou avaliação de risco, por se tratar de uma abordagem relativa baseada em uma unidade funcional (UF). A AICV corresponde à avaliação do inventário, identificando os possíveis impactos no meio ambiente e na saúde humana. Os impactos podem ser definidos como as consequências causadas pelos fluxos de entrada e de saída de um sistema na saúde humana, no meio ambiente, ou a disponibilidade futura dos recursos naturais.

Segundo a SETAC (2011), a AICV pode servir a dois objetivos: tornar os dados de inventário mais relevantes, pelo aumento do conhecimento acerca dos potenciais impactos ambientais; e facilitar a agregação e interpretação dos dados de inventário em formas que sejam mais manejáveis e significativas para a tomada de decisão.

A realização, e, conseqüente sucesso dessa etapa, está intrinsecamente ligada ao sucesso das etapas que a precedem, uma vez que é necessário verificar se a quantidade de dados é suficiente para conduzir a AICV, se a fronteira do sistema e o ICV estão adequados para o cálculo de indicadores, e se a realização da AICV é relevante de acordo com a unidade funcional do ICV (ABNT, 2009b).

Conforme a Norma ABNT NBR ISO 14.044 de 2009, esta fase apresenta uma série de elementos obrigatórios, sendo eles: seleção e definição das categorias de impacto; classificação e caracterização. Contudo, a depender do objetivo e escopo do estudo, ainda podem ser adicionadas etapas opcionais de normalização, ponderação e agrupamento.

A seleção e definição de categorias de impacto é o primeiro passo na fase de AICV e será considerada como parte da ACV global. Executado impreterivelmente durante a fase inicial de definição de objetivos e escopo, esse passo contribui para orientar o processo de

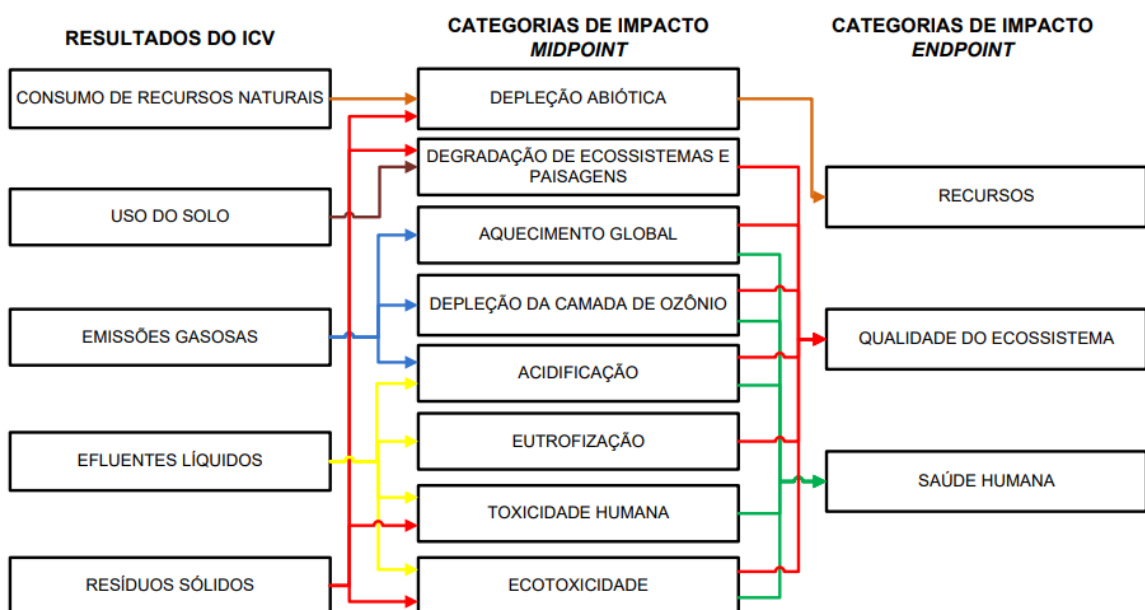
coleta de dados de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) e as reconsiderações seguintes a esta fase.

A classificação é a etapa na qual os dados gerados no inventário são associados a categorias de impactos ambientais. E na caracterização os dados obtidos são convertidos para os indicadores de referência de cada categoria (COLTRO, 2007).

Os elementos obrigatórios da AICV são capazes de converter os resultados do ICV em impactos potenciais, por modelos de caracterização de cada categoria de impacto, de acordo com os fatores de caracterização de cada substância e elemento do inventário (GUTIERREZ, 2014). De posse dessas informações, é possível indicar qual processo ou produto é mais ou menos impactante do ponto de vista ambiental.

Os Métodos da AICV possuem características específicas e apresentam duas formas distintas de abordagem: *midpoint* e *endpoint*. No que concerne ao *midpoint*, podemos destacar que é um indicador de impacto em potencial, onde os fluxos listados no ICV são agregados em categorias de impacto de acordo com uma característica em comum na cadeia de causa e efeito do mecanismo. Já o *endpoint* caracteriza as consequências das categorias de *midpoint* em áreas de proteção no final do percurso ambiental, associando os resultados do inventário com o respectivo impacto sobre as áreas de proteção (CAVALETT *et al.*, 2013). A Figura 2 representa as relações entre os resultados do ICV e as categorias de impacto *midpoint* e *endpoint*.

**Figura 2** - Representação dos resultados do ICV com as categorias de impacto



Fonte: Lopes, T. A. S. (2014).

#### Fase 4: interpretação do ciclo de vida

Conforme descrito na Norma ABNT NBR ISO 14.044 de 2009, a fase de interpretação do ciclo de vida de um estudo de ACV inclui elementos como: a identificação das questões significativas com base nas fases anteriores do estudo, a avaliação do estudo, considerando verificações de completeza, sensibilidade e consistência do estudo, além de apontar as limitações e recomendações do estudo, a partir das conclusões alcançadas, de modo que, com base no inventário do ciclo de vida, é possível identificar os principais fatores que possam vir a causar impacto. Estas quatro fases são interdependentes, sendo possível o retorno a uma delas em qualquer momento do estudo.

### 4.1 Aplicabilidade e limitações

Segundo Lopes (2014), as aplicações de ACV são divididas em duas principais direções: a primeira é a identificação de oportunidades de melhoria no desempenho ambiental, onde o estudo de ACV buscará os aspectos ambientais e os pontos críticos de impactos ambientais de um sistema, estabelecendo a sua contribuição para cada categoria de impacto, e, com isso, propor ações mitigadoras ou de minimização desses; a segunda corrente é a de comparação ambiental entre produtos/serviços que cumprem a mesma função, na qual se pretende avaliar os aspectos ambientais e seus impactos associados, a fim de que possa ser comparado o desempenho ambiental de cada qual.

Para Reap *et al.* (2008), em cada fase da ACV são encontrados problemas distintos que devem ser examinados e aprimorados. Na primeira fase, os problemas estão na escolha da unidade funcional, delimitação da fronteira do sistema, impactos socioeconômicos e considerações de cenários alternativos. No inventário, os pontos críticos estão na alocação de dados, os critérios para o que é representativo ou desprezível, e as especificidades técnicas locais. Na AICV, os problemas surgem, principalmente, na escolha dos métodos de avaliação, das categorias de impacto, e a singularidade e dinâmica do local. Na interpretação, os problemas são: a ponderação e avaliação e a incerteza nos processos de decisão.

No Brasil, os estudos de ACV se deparam com diversas limitações, dentre elas, como destacado por Rodrigues *et al.* (2008), a ausência de um banco de dados nacional robusto, que reflita a realidade brasileira e aperfeiçoe a aplicação da ACV tanto para os que estudam, quanto para os que trabalham com a ferramenta. Já para Piekarski *et al.* (2012), faltam métodos de AICV que retratem a realidade local e sejam direcionados para as características ambientais do país, já que os métodos de avaliação desenvolvidos consideram impactos

ambientais globais ou relativos ao local específico em que foram desenvolvidos, como Europa, Canadá e Estados Unidos.

Uma das maiores dificuldades encontradas em estudos de ACV, é a manipulação da grande quantidade de dados, sendo necessário o uso de *softwares*. Diante dessa dificuldade, foram desenvolvidos *softwares* para facilitar a aplicação de ACV, auxiliando na condução do estudo para torná-lo mais prático e confiável, permitindo que o processamento dos dados ocorra de forma mais eficaz, rápida e imparcial, garantindo cálculos de maior confiança, e resultando em relatórios finais de maior consistência (RODRIGUES *et al.*, 2008).

Um exemplo de software criado para estudos de ACV é o SimaPro© desenvolvido pela PRé-Consultants, na Holanda, que serve de ferramenta para comparar e analisar o desempenho ambiental de produtos e serviços com ciclos de vida complexos de forma sistemática e transparente, de acordo com a norma ISO 14040 (RODRIGUES *et al.*, 2008).

## 4.2 ACV aplicada ao tratamento de esgoto

A aplicação da ferramenta de avaliação do ciclo de vida a reatores UASB tem o objetivo de avaliar os impactos ambientais associados às diversas etapas do seu ciclo de vida (concepção, instalação, operação, manutenção e desativação). Lopes *et al.* (2017) afirmam que na Europa ACV vem sendo amplamente utilizada no que se refere à avaliação de potenciais impactos ambientais associados a sistemas de esgotamento sanitário, mostrando-se uma ferramenta eficaz para identificar de forma abrangente os impactos ambientais envolvidos em todas as fases do tratamento de esgotos.

De acordo com Lopsik (2013), em processos de tratamento de esgotos, a ACV trata com abrangência as questões ambientais e permite avaliar de forma integral os aspectos ambientais e potenciais impactos associados, tendo como resultado informações que podem auxiliar na escolha de tecnologias e identificar pontos críticos dos processos.

No Brasil, os estudos de ACV aplicados ao tratamento de esgoto ainda são muito modestos, não havendo uma grande quantidade de trabalhos publicados. Entretanto, quando se trata de um cenário mundial pode-se encontrar alguns trabalhos que utilizam da ferramenta para avaliar o desempenho ambiental de estações de tratamento de esgoto. A Tabela 1 apresenta um resumo de artigos com a aplicação rigorosa de ACV no tratamento de esgoto, com a descrição do autor, ano e local, objetivo e tecnologias estudadas, escopo do trabalho com a fronteira do estudo e a unidade funcional (UF), métodos de avaliação e software usado e por fim, os resultados obtidos.

**Tabela 1** - Resumo de trabalhos publicados aplicando ACV no tratamento de esgoto

Nº	Referência (Local)	Objetivo	Escopo	Método/Software	Categorias de impacto	Resultados
01	LOPSIK, K., 2013 (Estônia)	Avaliar os impactos ambientais de duas tecnologias usando ACV. Tecnologias: wetland construído vertical e horizontal e lodo ativado com aeração prolongada.	Inclui: sistema de esgoto, materiais de construção, uso da terra, uso de eletricidade, uso de químicos e os parâmetros de descarga do efluente tratado, para a construção e operação. UF: 1 PE (60g de DBO/h) durante 15 anos de operação.	Impact 2002 + e Recipe/SimaPro Faculty 7.2	Todas as categorias de <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i> .	O principal impacto do wetland é no uso de agregado leve de argila expandida. Os impactos do lodo ativado são no uso de energia e no efluente final, durante a operação.
02	PADILLA, <i>et al.</i> , 2013 (México)	ACV de 3 cenários de tratamento com baixa, média e alta vazão. Tecnologias: lodo ativado convencional e com aeração prolongada.	Tratamento do esgoto, dos resíduos sólidos e do lodo, inclui os materiais e energia, emissões atmosféricas, resíduos sólidos e disposição do lodo, para a operação. UF: 1 m <sup>3</sup> de esgoto em 20 anos.	CML2000/ SimaPro.	AD, AC, GWP 100, EU, PO, OLP, HT, TE.	O maior impacto no tratamento do esgoto é para GW e TE, devido ao uso de energia. A disposição dos resíduos contribui mais para OLD.
03	LOPES, T. A. S., 2014 (Brasil)	Avaliação dos potenciais impactos ambientais associados à fase de construção e operação de uma ETE composta por reator UASB seguido de Wetlands Construídos.	ETE composta por reator UASB seguido de 4 wetlands construídos e de um o tanque de contato de cloro com aplicação de solução de hipoclorito de sódio para a desinfecção do efluente final. UF: 1 m <sup>3</sup> de esgoto em 20 anos.	CML (GUINÉE, 2001), versão CML – IA (baseline) SimaPro 8.0.1	<i>midpoint</i> : Depleção Abiótica, Aquecimento Global, Eutrofização e Acidificação.	Os principais impactos na fase de construção se deram pelos materiais escolhidos para construção da ETE e na fase de Operação os impactos se deram principalmente pela característica do efluente do reator UASB e pela adição do hipoclorito de sódio para desinfecção do efluente final.

Legenda: População Equivalente (PE), Unidade Funcional (UF). Categorias de Impacto: Depleção Abiótica (AD), Aquecimento Global (GW), Depleção da Camada de Ozônio (OLD), Toxicidade Humana (HT), Ecotoxicidade Terrestre (TE), Oxidação Fotoquímica (PO), Acidificação (AC), Eutrofização (EU).



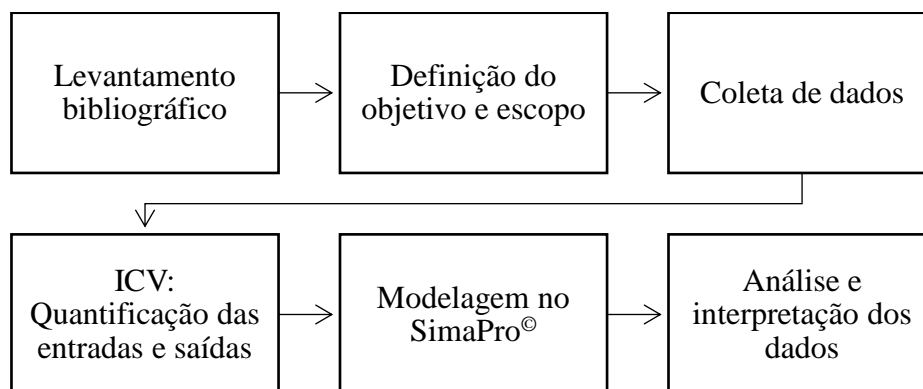
## 5 METODOLOGIA

Metodologicamente, a pesquisa caracterizou-se como bibliográfica e documental, tendo como material os trabalhos desenvolvidos nas dependências da Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários (EXTRABES), e, posteriormente, publicados, particularmente, aqueles que apresentaram dados referentes ao desempenho operacional de reatores UASB.

Situada na rua Cônsul Joseph Noujaim Habib Nacad, S/N, no bairro Tambor em Campina Grande – PB, sob a administração da Universidade Estadual da Paraíba, a EXTRABES é referência na produção de trabalhos científicos relativos ao tratamento de esgoto sanitário, e, desde sua criação, contribui de forma significativa para o enriquecimento das discussões relativas a essa temática.

Para o desenvolvimento da pesquisa foi realizado levantamento bibliográfico, a coleta de dados e a aplicação da metodologia de ACV. O fluxograma com as etapas de desenvolvimento do estudo está ilustrado na Figura 3.

**Figura 3** - Fluxograma de desenvolvimento do estudo



**Fonte:** Autor.

Para o cálculo das entradas e saídas foram utilizados dados secundários disponibilizados em estudos anteriores realizados na EXTRABES, dados de trabalhos científicos publicados por Melo *et al.* (2020) e Santos *et al.* (2019). O quantitativo das entradas e saídas de materiais, o consumo de energia e as emissões foram calculados para o reator com as características descritas na Tabela 2.

**Tabela 2** - Características do reator UASB

<b>Dimensões do Reator</b>	
Diâmetro	0,7 m
Altura útil	1,72 m
Volume	0,60 m <sup>3</sup>
<b>Parâmetros Operacionais</b>	
Vazão	630 L/dia
Forma de operação	Batelada
TDH teórico	0,95 dia
Carga hidráulica	1,052 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d
Carga orgânica	0,549 kg DQO/m <sup>2</sup> .d

Fonte: Melo et al. (2020).

Para a elaboração do inventário, o fluxo de materiais, o consumo de energia e as emissões foram calculados a partir da carga de poluentes da entrada de esgoto bruto e saída do efluente do reator UASB. As emissões foram calculadas com base em equações descritas nos estudos acadêmicos publicados sobre reatores UASB.

Os dados de entrada considerados foram: os indicadores físico-químicos de caracterização do esgoto bruto. Os dados de saída se referem às: emissões atmosféricas do reator UASB, o efluente tratado e o lodo biológico gerado no reator UASB. Os parâmetros físico-químicos utilizados para caracterização do esgoto bruto e do efluente final tratados neste estudo foram: Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Suspensos Totais (SST), Nitrogênio Total Kjeldahl (N<sup>-</sup>Total), Nitrogênio Amoniacal (N<sup>-</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) e Ortofosfato (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>).

As Tabelas 3 e 4 mostram os valores médios das concentrações para cada indicador do esgoto bruto e do efluente na saída do reator, encontradas por Melo *et al.* (2020) e Santos *et al.* (2019), onde as concentrações foram multiplicadas pela vazão para obtenção da carga aplicada referente a cada indicador. O quantitativo total é o somatório de toda a carga aplicada durante 20 anos de vida útil do equipamento.

**Tabela 3** - Concentração, carga e quantitativo total para os indicadores do esgoto bruto

<b>Indicadores – Esgoto Bruto</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/dia)</b>	<b>Carga</b>	<b>Quantitativo total</b>
DQO	523	mg/L	0,63	0,329 kg/dia	2401,7 kg
SST	183	mg/L	0,63	0,115 kg/dia	839,5 kg
N-NTK	56	mg/L	0,63	0,035 kg/dia	255,5 kg
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	46	mg/L	0,63	0,029 kg/dia	211,7 kg
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	6,1	mg/L	0,63	0,004 kg/dia	28,05 kg

Fonte: Adaptado de Melo *et al.* (2020).

**Tabela 4** - Concentração, carga e quantitativo total para os indicadores do efluente

<b>Indicadores – Efluente UASB</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/dia)</b>	<b>Carga</b>	<b>Quantitativo total</b>
DQO	190	mg/L	0,63	0,119 kg/dia	873,8 kg
SST	46	mg/L	0,63	0,029 kg/dia	211,5 kg
N-NTK	54	mg/L	0,63	0,034 kg/dia	248,3 kg
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	50	mg/L	0,63	0,032 kg/dia	229,9 kg
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	6,4	mg/L	0,63	0,004 kg/dia	29,43 kg

Fonte: Adaptado de Melo *et al.* (2020).

Para calcular as emissões atmosféricas do reator foi utilizado o balanço indicado por Lobato (2011) no qual indica que o biogás gerado nos reatores UASB é constituído de, aproximadamente, 75% de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e gases traço. Por ser o N<sub>2</sub> um gás inerte e o CO<sub>2</sub> se tratar de um gás de origem biogênica, eles não foram considerados em termos de potenciais de impacto ambiental, seguindo protocolo do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006).

Segundo Lobato (2011) a produção típica de gás metano é da ordem de 64,2 NL/m<sup>3</sup> de esgoto, sendo este valor reportado ao volume líquido produzido, já descontadas as perdas como gás residual (5%), outras perdas (5%) e a perda com o efluente (estimada em 20 mg/L). Desse modo, tem-se que a produção teórica de metano é de 61,48 g CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> de esgoto.

O lodo do reator foi a emissão considerada para o solo sendo estimado de acordo com o indicado por Von Sperling *et al.* (2014). A Tabela 5 mostra a quantidade de lodo e biogás gerado no reator.

**Tabela 5** - Carga e quantitativo total para indicadores de saída do reator

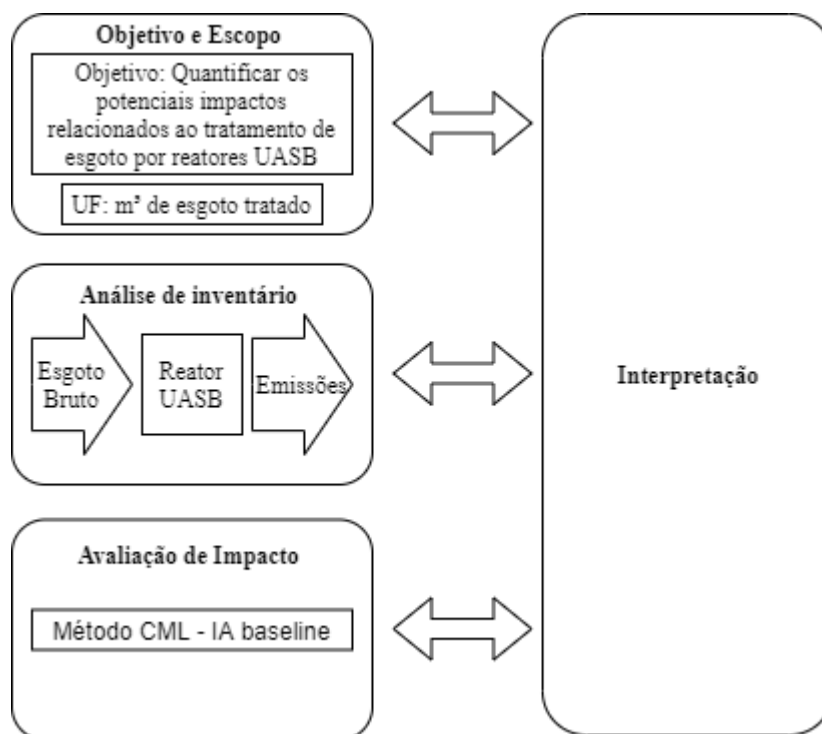
	<b>Carga</b>	<b>Quantitativo total</b>
Lodo retido	0,174 kg/dia	1274,79 kg
Biogás (CH <sub>4</sub> )	0,039 kg/dia	282,75 kg

Fonte: Autor.

## 5.1 Estrutura da ACV

O estudo seguiu a estrutura metodológica indicada pela ABNT NBR 14040/2009. A Figura 4 esquematiza a estrutura de abordagem da ACV para o sistema estudado.

**Figura 4** - Estrutura e abordagem da ACV para o estudo



**Fonte:** Adaptado NBR ISO 14040/2009.

### 5.1.1 Objetivo

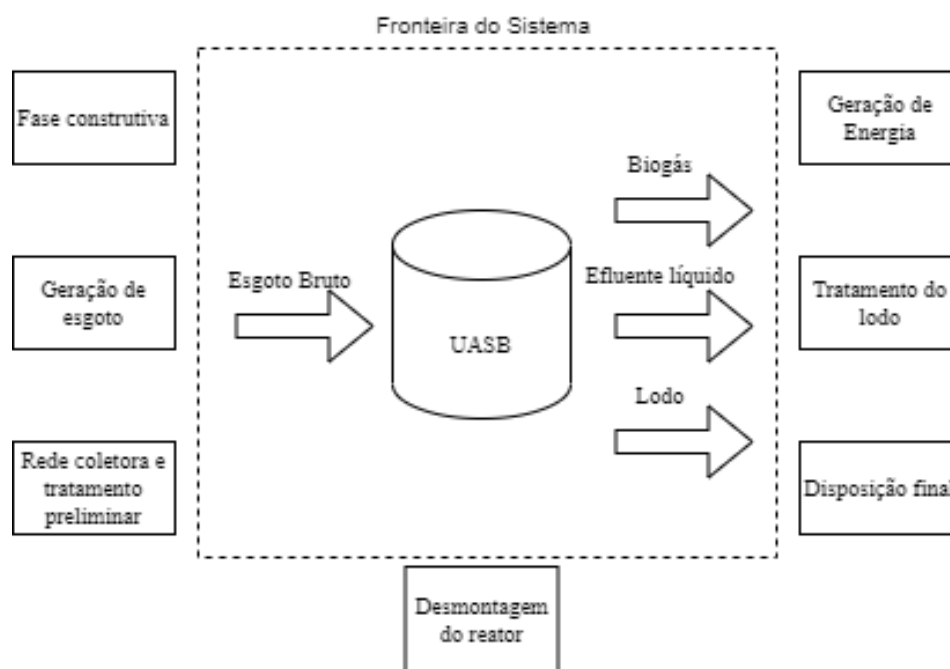
- **Aplicação pretendida** – Avaliação dos potenciais impactos associados à operação de um reator UASB tratando esgoto doméstico. Os impactos socioeconômicos não foram considerados.
- **Razões para execução do estudo** – Caracterizar o desempenho ambiental de reatores UASB, através da quantificação de impactos potenciais relacionados a esse tipo de tratamento de águas residuárias.

### 5.1.2 Escopo da ACV

- **Sistema estudado** – O sistema estudado foi um reator UASB em escala experimental para tratamento de águas residuárias localizado na EXTRABES.
- **Função do sistema** – A função do sistema é tratar esgotos sanitários, a fim de que sejam lançados no ambiente, com um padrão de qualidade exigido pela legislação vigente (Resoluções CONAMA n° 357/2005 e 430/2011).
- **Unidade funcional** – A unidade funcional utilizada para o sistema em estudo é o volume em metros cúbicos (m<sup>3</sup>) de esgoto tratado pelo reator durante um período de 20 anos. Com base em dados reais já se provou ser uma boa escolha a exemplo de estudos anteriores de ACV (Lopes, 2014 e Gutierrez, 2014).

- **Fronteira do sistema** – A fronteira do sistema considera somente o tratamento por reator UASB, sem considerar a coleta e transporte do esgoto até a EXTRABES e as etapas de tratamento, transporte e disposição final do lodo e biogás. A Figura 5 esquematiza o fluxograma da fronteira do sistema.

**Figura 5** - Fronteira do sistema



Fonte: Autor.

### 5.1.3 Metodologia de AICV e tipos de Impactos

Para a aplicação da metodologia da ACV foi utilizado o *software* SimaPro<sup>®</sup>. Para tanto, foi necessário se apropriar do *software*, inserir os dados do inventário no programa e interpretar os resultados gerados. Foi utilizado o SimaPro<sup>®</sup> na versão 9.0.2.1 com a licença Faculty (PRÉ, 2021), licença disponibilizada de forma gratuita para fins acadêmicos em países não pertencentes à OCDE, que dispõe de um grande número de bancos de dados e métodos de avaliação de impacto.

O ICV do reator foi compilado para o programa utilizando o método CML – IA (baseline) World 2000 versão 3.06 para as categorias de impacto *midpoint*: Aquecimento Global e Eutrofização.

O CML 2002 ou *Dutch Handbook on LCA* é um manual holandês publicado em 2002 que apresenta diretrizes operacionais para a realização de um estudo passo a passo de ACV,

com base nas normas ISO (Guinée, 2002). Esse método tem como objetivo oferecer a melhor prática para os indicadores de *midpoint*, operando em acordo com a série de normas da ISO 14040 e possui abordagem orientada ao problema ambiental. Neste caso, os dados de entrada e saída do ICV são correlacionados aos Fatores de caracterização calculando o indicador de categoria de acordo com o seu potencial de impacto para cada categoria.

O banco de dados escolhido para o inventário do ciclo de vida foi do *Ecoinvent 3*; uma vez que ainda não se tem um banco de dados robusto no Brasil, o *Ecoinvent* tem se mostrado satisfatório em estudos anteriores nos quais vem sendo amplamente utilizado.

#### **5.1.4 Requisitos de qualidade dos dados**

A Norma ABNT NBR ISO 14.044 de 2009 estabelece os requisitos de qualidade de dados que devem ser atendidos quando se pretende utilizar o estudo em afirmações comparativas. Como o presente estudo não tem caráter comparativo, não abrangeu todos os requisitos, sendo considerados apenas os seguintes:

- Cobertura temporal: os dados coletados correspondem ao período de operação do reator em 2019 e 2020;
- Cobertura geográfica: O reator fica localizado no município de Campina Grande estado da Paraíba, nas coordenadas geográficas de 7° 13' S e 35° 54' W;
- Cobertura tecnológica: o sistema conta com reator anaeróbico de alta taxa tipo UASB;
- Representatividade: os dados para o estudo foram coletados no local de funcionamento do reator, portanto, refletem a verdadeira situação de operação;
- Reprodutibilidade: a metodologia e os dados são representativos para o estudo de caso do reator e possibilitam a reprodutibilidade do estudo.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Inventário do ciclo de vida (ICV)

O inventário foi elaborado respeitando o balanço de massa das entradas e saídas no reator. Feito o levantamento de todos os dados, eles foram relacionados com a unidade funcional  $m^3$  de efluente tratado, considerando um período de 20 anos de operação. Esse horizonte está de acordo com outros trabalhos como Lopes (2014) e Gutierrez (2014) que utilizaram o mesmo período.

O inventário do ciclo de vida (ICV) da operação do reator UASB está apresentado na Tabela 6. Os dados de entrada correspondem ao esgoto afluente e a saída ao efluente líquido tratado pelo reator, as emissões atmosféricas e o lodo biológico gerado no seu interior. As entradas da esfera tecnológicas estão relacionadas com a nomenclatura dos processos do banco de dados do *Ecoinvent*<sup>®</sup>, disponíveis no *SimaPro*<sup>®</sup>, com a quantidade de cada aspecto para o tempo de vida útil do reator e a correlação com a unidade funcional. O indicador cuja origem consta como estimado, é devido ao valor ter sido calculado a partir de fontes secundárias e não coletado no reator.

Tabela 6 - Inventário de Ciclo de Vida reator UASB

<b>Saida conhecida para esfera tecnológica</b>	<b>Produtos e co-produtos</b>	<b>Total em 20 anos</b>	<b>UF</b>	
Efluente do reator UASB em estudo		4599	1 m <sup>3</sup>	
<b>Entradas conhecidas da natureza (Recursos)</b>	<b>Processo no SimaPro<sup>®</sup></b>	<b>Total em 20 anos</b>	<b>Correlação</b>	<b>Origem</b>
Esgoto afluente do reator				
DQO (Demanda Quimica de Oxigênio)	COD, Chemical Oxygen Demand, BR	2401,7 kg	0,522	MELO, 2020
Sólidos suspensos totais	Suspended solids, unspecified	839,5 kg	0,183	MELO, 2020
Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)	Nitrogen, total	255,5 kg	0,055	MELO, 2020
Nitrogênio Amoniacal (N-NH <sub>4</sub> )	Ammonia, as N	211,7 kg	0,046	MELO, 2020
Fósforo total	Phosphorus, total	9,33 kg	0,002	SANTOS, 2019
<b>Emissões para o ar</b>	<b>Processo no SimaPro<sup>®</sup></b>	<b>Total em 20 anos</b>	<b>Correlação</b>	<b>Origem</b>
Metano (CH <sub>4</sub> )	Methane, biogenic	282,75 kg	0,061	Estimado
<b>Emissões para a água</b>	<b>Processo no SimaPro<sup>®</sup></b>	<b>Total em 20 anos</b>	<b>Correlação</b>	<b>Origem</b>
DQO (Demanda Quimica de Oxigênio)	COD, Chemical Oxygen Demand, BR	873,8 kg	0,190	MELO, 2020
Sólidos suspensos totais	Suspended solids, unspecified	211,5 kg	0,046	MELO, 2020
Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)	Nitrogen, total	248,3 kg	0,054	MELO, 2020
Nitrogênio Amoniacal (N-NH <sub>4</sub> )	Ammonia, as N	229,9 kg	0,050	MELO, 2020
Fósforo total	Phosphorus, total	9,78 kg	0,002	SANTOS, 2019
<b>Fluxo Finais de resíduos</b>	<b>Processo no SimaPro<sup>®</sup></b>	<b>Total em 20 anos</b>	<b>Correlação</b>	<b>Origem</b>
Lodo	Sludge	1274,79 kg	0,277	Estimado

Fonte: Autor



## 6.2 Análise do Inventário de ciclo de vida (AICV)

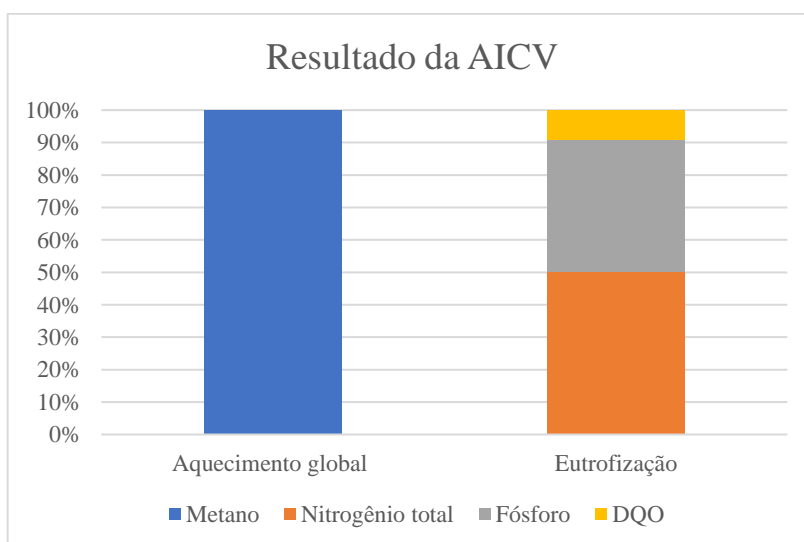
Com os dados obtidos para a realização deste trabalho, foi possível avaliar as seguintes categorias de impacto de *midpoint*: aquecimento global e eutrofização. A escolha da categoria de aquecimento global se deu pelo fato do reator UASB gerar uma quantidade considerável de gás metano, tendo em vista que esse é um dos principais gases do efeito estufa, já os nutrientes são os principais causadores da eutrofização dos corpos hídricos, o que justifica a escolha da categoria de eutrofização potencial. O critério para escolha das categorias também levou em consideração estudos anteriores de ACV aplicados a tratamento de esgoto como Lopes (2014) e Gutierrez (2014).

A categoria Aquecimento Global, também chamada de mudanças climáticas, está relacionada com as emissões de gases do efeito estufa. Os resultados são apresentados como aquecimento global potencial por 100 anos e expressos em kg CO<sub>2</sub>/kg de emissão. O escopo geográfico deste indicador é em escala global (PRÉ, 2020).

A categoria Eutrofização, inclui impactos associados ao aumento de macro nutrientes no meio, devido a emissões no ar, água e solo. É expressa em kg PO<sub>4</sub> equivalentes/kg de emissão. A escala geográfica varia entre local e continental (PRÉ, 2020).

O resultado da AICV do reator UASB é apresentado na Figura 6 para as categorias de impacto escolhidas. Estão incluídas no efluente final tratado as emissões para o ar e para a água, e isso se dá pelo fato do SimaPro<sup>®</sup> avaliar as emissões como o impacto gerado pelo produto final, que no caso deste estudo é o efluente do reator UASB.

**Figura 6 - Resultado da AICV**



Fonte: Autor.

Outras categorias de impacto como a depleção abiótica, ecotoxicidade e acidificação, apesar de serem importantes, não foram avaliadas devido à dificuldade no levantamento de dados confiáveis e robustos para uma aplicação coerente dessas categorias, sendo deixado como recomendáveis para trabalhos futuros.

A emissão de metano para o ar foi responsável pelo impacto potencial da categoria de impacto Aquecimento Global. O *SimaPro*® compreendeu que, mesmo em pequena quantidade, devido ao seu alto impacto para o aquecimento global, o metano é responsável por 100% dos potenciais impactos nessa categoria, expressando um resultado para o indicador de referência da categoria de 1,71kg de CO<sub>2</sub> equivalente.

A produção de biogás na digestão anaeróbia poderia ser convertida em um impacto positivo, caso fosse adotado um cenário no qual houvesse a recuperação de energia a partir da combustão desse biogás, isso refletiria em um uso menor de energia advinda de fontes geradoras mais poluentes, além da redução na emissão desse composto para a atmosfera, reduzindo os impactos na categoria de aquecimento global.

Para a categoria de impacto de eutrofização, o impacto potencial se deu, principalmente, pela emissão de nutrientes no efluente do reator UASB, sendo que a presença do nitrogênio no efluente foi responsável por 50,2% do potencial impacto de eutrofização, seguido da presença de fosforo em 40,6%. Vale salientar que mesmo com quantidade bastante reduzida quando comparada com o nitrogênio, o fosforo, devido ao seu elevado poder de eutrofização, praticamente se equiparou em termos de porcentagem. A demanda química de oxigênio (DQO) também teve uma parcela de importância nessa categoria de impacto, uma vez que foi responsável por 9,24% do potencial impacto de eutrofização do reator estudado. A Tabela 6 apresenta o resultado da caracterização das emissões para a categoria de impacto Eutrofização, expressando os resultados convertidos para os indicadores de referência de cada categoria

**Tabela 7** - Resultado da caracterização das emissões para a categoria Eutrofização

<b>Indicador</b>	<b>Unidade</b>	<b>total</b>
DQO	kg PO <sub>4</sub> - eq	0,004
Nitrogênio total	kg PO <sub>4</sub> - eq	0,023
Fósforo total	kg PO <sub>4</sub> - eq	0,018

**Fonte:** Autor

A definição de sustentabilidade de um sistema de tratamento de esgoto deve atender exigências prioritárias, e, nesse sentido, a eutrofização é uma categoria de impacto confiável podendo ser elencada como umas dessas. Entretanto, mesmo a ACV possibilitando avaliar o impacto em potencial, ela não permite inserção do grau de eutrofização de um corpo hídrico específico, fato esse que representa uma limitação da ferramenta.

Desse modo, para utilizar a ACV como ferramenta no suporte de decisão é importante incorporar outras ferramentas de avaliação de impacto para auxiliar as partes interessadas na tomada de decisão. A análise multicriterial é uma metodologia que pode contribuir significativamente para o sucesso dessa tomada de decisão, uma vez que, além de utilizar os aspectos elencados pela ACV, são considerados também os critérios sociais, econômicos, ambientais e operacionais nos processos decisórios.

## 7 CONCLUSÃO

Após a análise dos aspectos ambientais e potenciais impactos associados ao tratamento de esgoto sanitário por reatores UASB utilizando a metodologia ACV foi possível identificar os pontos críticos do funcionamento do reator e quantificar os potenciais impactos ambientais associados a operação do reator UASB.

O estudo também evidenciou a necessidade da construção de um banco de dados local robusto, que dê suporte a estudos mais aprofundados e em diferentes categorias de impacto.

Recomenda-se a associação da metodologia ACV com metodologias de avaliação e tomada de decisão como a análise multicriterial tendo em vista a abrangência dos aspectos relacionados a determinação da escolha do sistema de tratamento de esgoto doméstico.

Por fim, o estudo cumpriu os objetivos estipulados, contribuindo para o enriquecimento da avaliação do ciclo de vida aplicado aos sistemas de tratamento de esgoto, ainda que os resultados encontrados sejam condicionados às considerações assumidas para a realização do estudo.

## REFERÊNCIAS

- BRASIL. **ABNT NBR 14040**. Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- BRASIL. **ABNT NBR 14044**. Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- BRASIL. **Lei Federal N° 11.445, de 15 de julho de 2020**. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico. Brasília: Presidência da República, [2020]. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2007/Lei/L11445.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Lei/L11445.htm). Acesso em 25 de out. de 2020.
- BRASIL. **Lei Federal N° 14.026, de 15 de julho de 2020**. Dispõe sobre a atualização do marco legal do saneamento básico no Brasil. Brasília: Presidência da República, [2020]. Disponível em [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/L14026.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14026.htm). Acesso em 01 de nov. de 2020.
- BRASIL. **Resolução CONAMA n° 430/2011** - Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Conselho nacional do meio ambiente – CONAMA, Brasil.
- CAVALETT, O. *et al.* Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, V. 18. p. 647–658, 2013.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Princípio do tratamento biológico de águas residuárias – Reatores anaeróbios**. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de engenharia sanitária e ambiental – DESA/UFMG, 2007.
- CHERNICHARO, C. A. L. et al. Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. **Revista DAE**. Núm. 213, vol. 66. 2018.
- COLTRO, L. (org.). **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão**. Campinas: CETEA/ITAL, 2007.
- GUTIERREZ, K. G. **Análise e gerenciamento de impactos ambientais no tratamento de esgoto doméstico mediante avaliação de ciclo de vida**. 2014. 112 f. Tese (Doutorado) Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- KALAKUL, S. *et al.* Integration of life cycle assessment software with tools for economic and sustainability analyses and process simulation for sustainable process design. **Journal of Cleaner Production**, v.71, p.98-109, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.022>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652614000353?via%3Dihub>. Acesso em 05 nov. 2020.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 2011. 184 f. Tese (Doutorado) – Programa de PósGraduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LOPES, T. A. S. **Avaliação do ciclo de vida de uma ETE composta por reator UASB seguido de Wetlands construídos**. 2014. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

LOPES *et al.* Revisão crítica da literatura sobre aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida ao tratamento de esgotos. **Revista Dae**, [s.l.], v. 65, n. 208, p. 47-55, 2017. Revista DAE. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2017.005>

LOPSIK K. (2013). Life cycle assessment of small-scale constructed wetland and extended aeration activated sludge wastewater treatment system. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 10, 1295-1308

MELO *et al.* Pós-tratamento de efluente de reator UASB em filtro anaeróbio. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 13838-13847. 2020. DOI:10.34117/bjdv6n3-302. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/7868/6822>. Acesso em 12 jan. 2021.

PRÉ. **SimaPro Database Manual: Methods library**. San Francisco: Pré, 2020. Versão 4.15.

REAP, J. *et al.* A survey of unresolved problems in life cycle assessment. Part 1: goal and scope and inventory analysis. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, volume 13, p. 290 – 300, 2008.

RODRIGUES, C. R. B. *et al.* Sistemas computacionais de apoio a ferramenta Análise de Ciclo de Vida do produto (ACV). In: **XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável. Rio de Janeiro, outubro de 2008.

SANTOS *et al.* Análise comparativa entre o sistema convencional de Lagoas de estabilização com reator uasb seguido de Lagoas de polimento. **39º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Natal, 2019. Disponível em: [http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/55025/1/2019\\_eve\\_sdslucas.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/55025/1/2019_eve_sdslucas.pdf). Acesso em 10 jan. 2021.

SETAC. Society for Environmental Toxicology and Chemistry. Description of Life Cycle Assessment. Disponível em: <http://www.setac.org/node/32>.

SOUSA, J. T. *et al.* Utilização de wetland construído no pós-tratamento de esgotos domésticos pré-tratados em reator UASB. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 4, p. 285-290, dez. 2004. <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522004000400004&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522004000400004&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 29 de nov. 2020.