

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTO E LODO BRASÍLIA NORTE:
LEVANTAMENTO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO
ESTUFA**

CAROLINA DE SOUSA MARTINS ARRAIS

ORIENTADOR: FRANCISCO JAVIER CONTRERAS PINEDA

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2020

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTO E LODO BRASÍLIA NORTE:
LEVANTAMENTO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO
ESTUFA**

CAROLINA DE SOUSA MARTINS ARRAIS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

FRANCISCO JAVIER CONTRERAS PINEDA, PHD., PROFESSOR ADJUNTO
(ENC/UNB)
(ORIENTADOR)

ARIUSKA KARLA BARBOSA AMORIM, PHD., PROFESSORA ADJUNTA
(ENC/UNB)
(EXAMINADORA INTERNA)

CLÁUDIO HEINRIQUE DE ALMEIDA FEITOSA PEREIRA, DR., PROFESSOR
ADJUNTO
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 21 DE DEZEMBRO DE 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

DE SOUSA MARTINS ARRAIS, Carolina

ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO E LODO BRASÍLIA NORTE: LEVANTAMENTO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

ix, 69 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2020)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. ACV

2. IMPACTOS AMBIENTAIS

3. GEE

4. TRATAMENTO DE ESGOTO

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARRAIS, C. S. M. (2020). *ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO E LODO BRASÍLIA NORTE: LEVANTAMENTO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 69 p.

CESSÃO DE DIREITOS

CAROLINA DE SOUSA MARTINS ARRAIS:

ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO E LODO BRASÍLIA NORTE: LEVANTAMENTO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA:

GRAU/ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2020

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

CAROLINA DE SOUSA MARTINS ARRAIS

CSMARRAIS@GMAIL.COM

AGRADECIMENTOS

A todos que sonharam comigo meu sonho ancestral.

RESUMO

As emissões de gases de efeito estufa decorrentes da coleta e tratamento de esgoto são uma parcela significativa e crescente das emissões nacionais, com perspectiva de mais crescimento para as próximas décadas, considerando o déficit no fornecimento desses serviços. A quantificação desses e outros impactos pode ser feita por meio da aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), uma técnica que contabiliza os impactos do ciclo de vida de um produto ou serviço, da extração de matéria prima à destinação final. Com o objetivo de analisar o impacto de contribuição para o aquecimento global decorrente do tratamento de esgoto e de lodos na Estação de Tratamento de Esgotos Brasília Norte (ETE BN) foi aplicado o método de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), para cálculo das emissões de gases de efeito estufa provenientes da construção e operação da Estação de Tratamento de Esgoto Brasília Norte, em uma abordagem *bottom-up*. Os resultados da ACV aplicada à ETE BN indicam que em 2013 foram emitidos na estação 6.093.052,90 kg de GEE em CO₂e, 0,01% das emissões de todo o setor de tratamento de resíduos no Brasil em 2013. O serviço de coleta e tratamento de esgoto e lodo prestado pela ETE BN emitiu em 2013 37.267,74 kg CO₂e por pessoa-equivalente atendida. Do total de emissões da ETE BN, o gerenciamento de lodos foi responsável por 25.730,80±2.928,07kg CO₂e, uma pequena parcela das emissões totais. Na ETE BN, a maior parte das emissões são relacionadas ao consumo de energia elétrica.

Palavras-chave: ACV, Tratamento de Esgoto, Tratamento de Lodo, GEE.

ABSTRACT

The emissions of greenhouse gases from the treatment of wastewater are a significant and growing portion of Brazilian emissions, expressly due to the deficit in providing these services and the prospect of growth in this sector for the coming decades. The Life Cycle Assessment (LCA) method is a technique that quantifies the impacts on the life cycle of a product or service through the application of cradle to grave life cycle inventories. In order to estimate the emissions from wastewater and sludge treatment at the Brasília Norte Wastewater Treatment Plant (BNWWTP), LCA was applied based on the bottom-up approach, to calculate the greenhouse gas emissions from the construction and operation of the BNWWTP. The LCA results indicate that 6,093,052.90 kg of GHG in CO₂e were emitted in 2013 at BNWWTP, 0.01% of the emissions from the entire waste treatment sector in Brazil in 2013. The wastewater and sludge treatment provided by BNWWTP emitted 37,267.74 kg CO₂e per person-equivalent in 2013. The treatment and final disposal of sewage sludge were responsible for 25,730.80 ± 2,928.07 kg CO₂e of the total emissions from BNWWTP in 2013. The sludge treatment line represented a small portion of total emissions, most related to electricity consumption.

Keywords: Life cycle assessment, wastewater treatment, sludge treatment, GHG.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	11
2.1 OBJETIVO GERAL.....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
4.1 TRATAMENTO DE ESGOTO E GERENCIAMENTO DE LODO	17
4.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DIRETOS ASSOCIADOS AO TRATAMENTO DE ESGOTO.....	20
4.3 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA PARA QUANTIFICAÇÃO DOS IMPACTOS	22
5 METODOLOGIA.....	26
5.1 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	26
5.2 ESTUDO DE CASO	30
5.2.1 Fronteiras do sistema - Área de estudo	30
5.2.2 Tecnologias do inventário: tratamento da fase líquida.....	35
5.2.3 Tecnologias do inventário: tratamento da fase sólida na ETL	35
5.2.4 Hipóteses para o cálculo dos fatores de impacto.....	39
5.2.5 Processos da base de dados similares à ETEBN	42
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
6.1 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO INVENTÁRIO E CENÁRIOS ALTERNATIVOS	47
6.2 FATORES DE IMPACTO	51
6.3 IMPACTOS DA ETEB NORTE: CONTRIBUIÇÃO PARA O AQUECIMENTO GLOBAL	52
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	57
7 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Boneca russa matriochka e o processo da base de dados EcoInvent 3.6 referente ao transporte em caminhão	15
Figura 4-1: Etapas da ACV (ABNT, 2004; ISO, 1998).	22
Figura 4-2 Número de publicações sobre ACV entre 1997 e 2020. (Web of Science, 2020).	23
Figura 5-1: Etapas de ACV aplicadas à ETE Brasília Norte	26
Figura 5-2: Captura de tela do <i>OpenLCA</i> . Fluxos de entrada no processo da base de dados EcoInvent 3.6 que modela o tratamento em uma ETE	27
Figura 5-3: Sistema do produto referente a uma ETE.	28
Figura 5-4: Definição das propriedades de cálculo no <i>OpenLCA</i>	28
Figura 5-5 Resultados do cálculo de fatores de impacto em uma ETE pelo método CML-IA baseline no Software <i>OpenLCA</i>	29
Figura 5-6: Localização das estações de tratamento de esgotos do DF.....	30
Figura 5-7: Vazões de projeto das ETE do DF. Fonte: Concessão de dados via Lei de Acesso à Informação em 2019.....	31
Figura 5-8: Localização das bacias de esgotamento das ETE do DF. Fonte: Plano Distrital de Saneamento Básico (2017)	32
Figura 5-9 - Localização da ETE Brasília Norte	33
Figura 5-10: Situação da ETEB Norte quanto à APA e APP.....	34
Figura 5-11: Mapa de localização da bacia de esgotamento da ETEBN, com evolução da ocupação urbana	34
Figura 5-12: Fluxograma de tratamento de Águas residuárias na ETEB Norte, ETL em destaque vermelho (Batista, 2015).	35
Figura 5-13 Fluxo médio diário de lodo em m ³ nas etapas de tratamento da fase sólida na ETEB Norte em 2013 (Batista, 2015). Elaborado no programa STAN 2.6.801	36
Figura 5-14: Representação esquemática dos processos e operações considerados no processo de tratamento de esgoto doméstico da base de dados EcoInvent 3.6 (Doka, 2003b).....	43
Figura 5-15: Caçamba de transporte de lodo na ETEB Sul (Governo Do Distrito Federal, 2017).....	46

Figura 5-16 Fatores de emissão considerados para o cálculo das emissões de CO2 relacionadas à destinação do lodo na recuperação de áreas degradadas. Adaptado de BOEIRA et al. (2009).....	47
Figura 6-1: Fluxos de entradas e saídas na ETL e ETEBN em 2013. Elaboração no programa STAN 2.6.801.....	48
Figura 6-2: Cenário de tratamento do lodo desaguado em unidade de incineração	49
Figura 6-3: Cenário de tratamento do lodo em uma unidade de incineração	50
Figura 6-4: Cenário de coprocessamento do lodo na fabricação de clínquer	51
Figura 6-5-Fatores de impacto, potencial de contribuição para o aquecimento global em 100 anos	52
Figura 6-6: Emissões de GEE em CO2e da ETEB no ano de 2013, comparação com as emissões nacionais para o setor de tratamento de resíduos nesse ano (MCTIC, 2020).....	53
Figura 6-7: Parcela do gerenciamento de lodo nas emissões da ETEBN em kg de CO2e em 2013	53
Figura 6-8: Incerteza para as emissões de GEE dos processos	54
Figura 6-9: Potencial de contribuição do gerenciamento de lodo na ETEBN em 2013 (Cenário 1) para o aquecimento global em 100 anos	55
Figura 6-10: Comparação entre os cenários em relação às emissões de GEE	55
Figura 6-11: Potencial de contribuição para o aquecimento global em 100 anos do cenário 2	56
Figura 6-12: Potencial de contribuição para o aquecimento global em 100 anos do cenário 3	56
Figura 6-13: Potencial de contribuição para o aquecimento global em 100 anos do cenário 4	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.3-1 - Estimativa do consumo de energia elétrica nas ETE do DF em 2013 (CAESB, 2020).....	41
Tabela 5.3-2: Classes de ETE disponíveis na base de dados EcoInvent 3.6, comparação com a ETEB Norte (Batista, 2015; Doka, 2003b)	42
Tabela 0-1 - Comparação entre os parâmetros do esgoto afluyente à ETEB Norte com os parâmetros do esgoto afluyente considerado no processo de tratamento da base de dados EcoInvent 3.6.....	64

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3-1.....	11
Equação 3-2.....	11
Equação 3-3.....	11
Equação 4-1	23
Equação 4-2	26
Equação 5-1	40
Equação 5-2	41
Equação 5-3	44
Equação 5-4	44
Equação 5-5	44

LISTA DE ABREVIACOES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ACV	Análise de Ciclo de Vida
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
DBO	Demanda Bioquímica de Oxignio
CO ₂	Dióxido de carbono
CV	Ciclo de Vida
DF	Distrito Federal
CO _{2e}	Equivalente em dióxido de carbono
ETA	Estaco de tratamento de gua
ETE	Estaco de Tratamento de Esgoto
ETEBN	Estaco de Tratamento de Esgoto Brasília Norte
ETL	Estaco de Tratamento de Lodo
GEE	Gases de Efeito Estufa
Gg	Giga gramas
MO	Matéria Orgânica
CH ₄	Metano
N ₂ O	xido Nitroso
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico

1. INTRODUÇÃO

Águas residuárias são as águas rejeitadas após utilização em diversos processos, são classificadas entre urbanas (pluviais e de lavagem de pavimentos) e esgotos (industriais ou domésticos). Os esgotos são resíduos gerados em consequência de diversos tipos de usos da água e são classificados entre sanitários e industriais. Esgotos industriais derivam da utilização da água para fins industriais e possuem características físico-químicas muito variáveis, em função da atividade exercida pela indústria. Esgotos domésticos resultam da utilização da água para fins domésticos e, portanto, são gerados em residências, edifícios comerciais, instituições e outras edificações que possuam banheiros, cozinhas ou lavanderias. A maior parte dos sólidos que compõem o esgoto doméstico são de origem orgânica, uma combinação de carbono, hidrogênio e nitrogênio, formando os seguintes grupos de substâncias orgânicas: proteínas, carboidratos, gorduras, óleos, ureia, surfactantes, fenóis e pesticidas (Jordão e Pessôa, 2005).

Esgotos derivados das atividades domésticas podem ser tratados in loco (fossas sépticas, fossas rudimentares), ou em estações de tratamento (tratamento centralizado, que necessita de redes de coleta, estações elevatórias e outras estruturas) (Davis, 2016). De maneira irregular, em alguns locais os esgotos são lançados nos corpos hídricos em estado bruto. O Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) define que uma população está em déficit sanitário quando recebe serviços de saneamento com qualidade inadequada, possui soluções sanitárias inadequadas ou não possui soluções sanitárias (MINC, 2014). O setor de saneamento no Brasil encontra-se deficitário em relação à coleta e tratamento de esgotos domésticos. Em 2018, apenas 46,3% do esgoto gerado no país foi tratado, enquanto 74,5% do esgoto coletado foi tratado. Nesse ano apenas quatro unidades da federação apresentaram índices de atendimento urbano com rede coletora de esgoto acima de 70%: São Paulo, Paraná e Minas Gerais e o Distrito Federal (SNIS, 2018).

No Distrito Federal, o índice de atendimento dos serviços de coleta de esgoto doméstico variou de 97,99% em 2009 a 84,51% em 2015, e essa queda é devida ao aumento da presença de ocupações irregulares no território do DF. Apesar da ausência de rede de coleta nas regiões não regularizadas, o índice de tratamento de águas residuárias coletadas para o DF é 100% (GDF, 2017).

Ainda em cenários de atendimento pleno, os serviços de saneamento causam impactos ambientais não negligenciáveis, como a emissão de gases de efeito estufa (GEE): CO₂, CH₄ e N₂O (IPCC, 2006). Tanto o tratamento de águas residuárias quanto o tratamento de

resíduos sólidos são considerados como parte do setor de tratamento de resíduos. O setor de tratamento de resíduos é um dos seis setores da economia considerados na elaboração de inventários nacionais de emissões de GEE. No Brasil em 1990, a contribuição desse setor para o aquecimento do planeta foi estimada em 26.005,90 Gg de CO₂e, uma parcela de 1,9% do total nacional. Nas décadas seguintes houve crescimento progressivo dessa contribuição, e em 2020 o setor contribuiu para o aquecimento do planeta com 54.126,80 Gg de CO₂e, o que representa 4,3% das emissões nacionais desse ano (MCTIC, 2020).

As emissões em Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) podem ser classificadas entre diretas e indiretas. As emissões de GEE diretas acontecem durante a remoção de nitrogênio, que pode formar o N₂O (óxido nitroso) como subproduto, e ocorrem também na digestão anaeróbia, no decantador primário e em toda a linha de tratamento de lodos, com a emissão de CH₄ (IPCC, 2006). Ainda, a DBO e o nitrogênio residuais presentes no efluente tratado na ETE podem provocar a emissão de N₂O e de CH₄ após o lançamento nos corpos hídricos. As emissões indiretas são calculadas a partir da cadeia de produção de insumos químicos, energia elétrica e meios de transporte utilizados no sistema de tratamento (Parravicini *et al.*, 2016).

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica para levantamento dos impactos ambientais diretos e indiretos que possibilita a estimativa de impactos ambientais, na saúde humana ou em consumo de recursos naturais, e permite a identificação dos elementos do sistema estudado mais críticos, para auxílio na tomada de decisões (Baumann e Tillman, 2004). O presente trabalho tem o objetivo de calcular as emissões de GEE em equivalente a dióxido de carbono (CO₂e) derivadas da prestação do serviço de coleta e tratamento de esgoto na ETE Brasília Norte, por meio da técnica de ACV, além do levantamento de impactos ambientais de cenários alternativos para tratamento e destinação final. Como parte das etapas de ACV, um estudo de caso sobre a ETE Brasília Norte será apresentado.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar, através do método de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), os impactos ambientais de contribuição para o aquecimento global, decorrentes do tratamento de esgoto e de lodos na Estação de Tratamento de Esgotos Brasília Norte (ETE BN).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar os potenciais de contribuição para o aquecimento global decorrentes dos tratamentos de esgoto e de lodo na ETE BN;
- Determinar os potenciais de contribuição para o aquecimento global decorrentes dos tratamentos de esgoto e de lodo em cenários alternativos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A norma técnica NBR ISO 14040, define a ACV como uma técnica de estudo dos aspectos ambientais e impactos potenciais associados ao ciclo de vida de um produto. Essa avaliação é feita desde a extração de matéria prima, passa pela produção, pelo uso e termina com a destinação final. Os impactos ambientais a serem analisados nesse tipo de avaliação podem ser categorizados em:

- Uso dos recursos;
- Saúde Humana;
- Consequências ecológicas.

Segundo essa norma, a ACV de um produto é realizada a partir da compilação de um inventário de entradas e saídas na cadeia de produção do produto, seguida por avaliação dos impactos ambientais potenciais associados a essas entradas e saídas e interpretação dos resultados das fases de análise de inventário e da avaliação de impactos.

A NBR ISO 14040 data de 2001 e é baseada na ISO 14040 *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*, de 1997. Nessa norma a Comissão de Estudo de Avaliação de Ciclo de Vida reconhecia que a ACV, como técnica, estava em seus estágios iniciais de desenvolvimento e necessitava de mais aplicações práticas, assim, recomenda que seus resultados sejam interpretados e analisados com consideração a este fato. Uma das limitações apontadas na época é a falta de abordagem econômica nos seus métodos. A subjetividade na definição das fronteiras do sistema é outra limitação do método, assim como a limitação dos modelos para análise de inventário a suposições subjetivas, que

podem não englobar todos os impactos e aplicações. Além disso, a acurácia dos resultados da ACV é limitada à disponibilidade e qualidade dos dados utilizados e a comparação entre os resultados de diferentes ACV é imprecisa para estudos que adotaram diferentes hipóteses. Portanto, essa técnica necessita que as hipóteses sejam explicitadas com clareza e transparência. Outra fonte de incertezas é o fato de o inventário não incluir as variações espaciais e temporais.

➤ Estrutura

A norma NBR ISO 14040 resolve que a ACV deve incluir as fases de definição de um objetivo, escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados. Para a definição do objetivo e escopo, são determinados os fins e os meios do estudo, por meio da descrição do sistema a ser estudado e determinação das categorias de impacto que serão consideradas. O objetivo e o escopo do estudo devem estar claramente definidos e alinhados com a aplicação pretendida, a extensão geográfica, o horizonte de tempo do estudo e a qualidade dos dados que serão necessários. O objetivo deve informar as razões do estudo, a aplicação pretendida, e o público alvo. As entradas e saídas consideradas na ACV, a categorização dos dados e o tipo de modelagem do sistema devem estar alinhados com o objetivo do estudo. A definição do escopo considera e define com clareza as funções do sistema em estudo, a unidade funcional, o sistema em si e suas fronteiras, os procedimentos de alocação, os tipos de impacto e metodologia de avaliação de impacto, suposições, limitações, requisitos de qualidade dos dados iniciais, tipo de análise crítica e tipo de relatório requerido para o estudo. Um escopo bem definido garante que a abrangência, a profundidade e o grau de detalhe do estudo atendam ao objetivo requerido. A NBR ISO 14040 adverte que a ACV é uma técnica iterativa, cujos parâmetros podem ser alterados durante a execução do estudo.

➤ Limites do Sistema

As fronteiras do sistema em estudo são determinadas a partir da aplicação pretendida, das suposições, dos critérios de corte e restrições de dados. As fronteiras determinam quais elementos do processo entram na avaliação e é importante que o sistema seja modelado com base em fluxos elementares. Para a presente análise, as fronteiras geográficas estudadas são os limites da ETE Brasília Norte, sua bacia contribuinte, e os territórios envolvidos na fabricação de insumos e produção de energia. O período do inventário é o ano de 2013, com base nas informações levantadas por Batista (2015). As tecnologias inventariadas são os processos e operações de tratamento de esgoto e lodo de esgoto. Foram levantados dados secundários sobre o tratamento de esgoto (tecnologias de tratamento, vazão afluente, consumo de insumos químicos consumo de energia elétrica) e gerenciamento de lodos

(tecnologias de tratamento e destinação final, fluxo de volume, consumo de insumos químicos, consumo de energia elétrica e transporte)

➤ Unidade funcional

A unidade funcional é uma referência que relaciona as entradas e saídas do sistema. A definição da unidade funcional garante a comparabilidade entre diferentes estudos (ABNT, 2001). Os impactos calculados para a ETEBN serão demonstrados também por pessoa atendida, ou pessoa-equivalente, para possibilitar futuras comparações com avaliações de ciclo de vida de outras ETE ou outros cenários.

➤ Inventário

A etapa de análise do inventário do ciclo de vida envolve a coleta de dados e cálculos, a quantificação das entradas e saídas pertinentes ao sistema estudado. Essa etapa é iterativa, ou seja, a medida que se conhece melhor o sistema, são identificados novos requisitos ou limitações para os dados, de forma que mudanças no procedimento de coleta dos dados sejam necessárias, ou até mesmo revisões no objetivo e no escopo do estudo (ABNT, 2004).

Para cada unidade do processo dentro das fronteiras do sistema é realizada uma coleta de dados. O procedimento de coleta de dados depende do escopo definido e para os procedimentos de cálculo são realizadas alocações de processos, entradas e saídas. Assim como, ao utilizar o fluxo de energia nos cálculos, deve se considerar e explicitar a matriz energética, a eficiência de conversão e distribuição, assim como as entradas e saídas associadas com a geração e o uso da energia (Baumann & Tillman, 2004). Para auxílio na tomada de decisão da fase de interpretação e análise crítica, cenários alternativos foram construídos, para a escolha de alternativas de tratamento e disposição final com maior potencial de redução de impactos.

➤ Agregação

Para permitir que os objetivos e o escopo do estudo sejam atendidos, convém que os dados do estudo respondam a uma série de requisitos de qualidade, sendo eles:

- Precisão, completeza e representatividade dos dados;
- Consistência e reprodutibilidade dos métodos usados ao longo da ACV;
- Fontes dos dados e sua representatividade;
- Incerteza da informação.

A NBR ISO 14040 enfatiza que quando a aplicação da ACV é a comparação entre cenários, como no caso do presente estudo, uma atenção rigorosa deve ser dada aos requisitos de qualidade dos dados citados. Portanto, quando a ACV é utilizada enquanto instrumento

de comparações, para prezar pela equivalência dos sistemas em comparação, estes devem ser comparados com base na mesma unidade funcional, tendo em vista equivalentes considerações metodológicas, em relação ao desempenho e fronteiras do sistema, requisitos de qualidade dos dados, procedimentos de alocação e regras de decisão para avaliação dos impactos.

De forma a prezar pela transparência do estudo, quaisquer divergências entre sistemas com relação às considerações metodológicas supracitadas serão relatadas e detalhadas. As comparações realizadas serão acompanhadas de um processo de análise crítica. A análise crítica verifica se o estudo responde aos requisitos da NBR 14040 quanto à metodologia, aos dados e ao relatório.

Para o cálculo dos impactos ambientais, foi feita a multiplicação apresentada na equação a seguir.

$$I = g \times f \quad \text{Equação 3-1 (Baumann e Tillman, 2004)}$$

Sendo : I = Impacto (kg CO_{2e});

g = Grandeza do fluxo levantado no inventário (m³ de esgoto afluyente, ou kg de lodo tratado, ou distância percorrida em um veículo)

f = fator de impacto (kg CO_{2e}/m³, CO_{2e}/kg, ou CO_{2e}/km).

Tanto a construção do inventário quanto o cálculo dos fatores de emissão apresentam incertezas. A multiplicação da incerteza dos dados do inventário com a incerteza dos fatores de emissão foi calculada a partir da equação a seguir.

$$\sigma^2_{prod} = e^{\sqrt{\sum_i \ln^2 \sigma^2_i}} \quad \text{Equação 3-2 (Doka, 2003a)}$$

Sendo: σ^2_{prod} = Produto de desvios padrão;

σ^2_i = Cada um dos desvios padrão a serem multiplicados.

Para o inventário de entradas e saídas do sistema estudado, a incerteza dos dados de operação são os desvios padrão das grandezas medidas regularmente na ETEBN, e apresentadas por Batista (2015). O desvio padrão é a medida de dispersão de uma distribuição normal, ou seja, da diferença entre os valores de um conjunto de dados e a sua média (Bonamente, 2017). No cálculo dos fatores de emissão são utilizadas bases de dados

que possuem inventários e medidas de incerteza, desvios padrão (Doka, 2003a). Os impactos totais apresentam, portanto, uma incerteza resultante dos desvios padrão do inventário e do desvio padrão do fator de impacto.

➤ Cálculo dos fatores de impacto: Open LCA e base de dados EcoInvent

Para a estimativa dos impactos ambientais, foi necessário o cálculo dos fatores de impacto ambiental no programa *OpenLCA* com a base de dados EcoInvent 3.6. Os impactos quantificados são relacionados ao potencial de aquecimento global em 100 anos e expressos em equivalente de CO₂ (CO₂e).

O *OpenLCA* é um *framework* modular para modelagem de inventários de ciclo de vida, que permite a construção de modelos a partir de bases de dados (GreenDelta, 2020). A base de dados EcoInvent 3.6 funciona como uma rede de inventários de ciclo de vida, porque os seus processos unitários estão interconectados (Weidema *et al.*, 2009). Os processos unitários são constituídos por outros processos da base de dados, de maneira comparável à tradicional boneca russa matriochka.

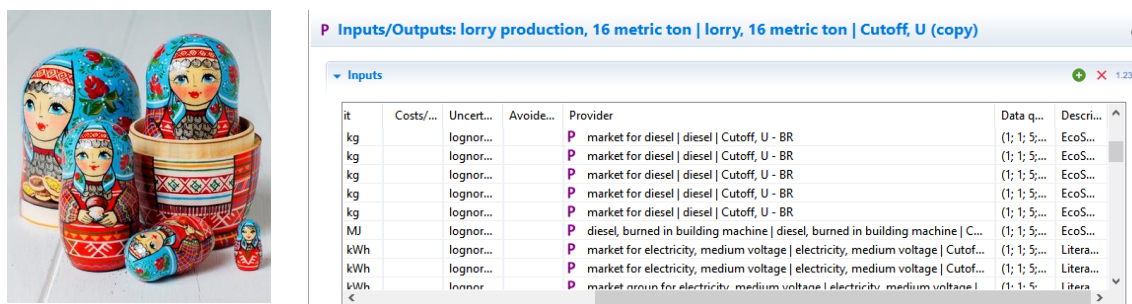


Figura 3-1: Boneca russa matriochka e o processo da base de dados EcoInvent 3.6 referente ao transporte em caminhão

As entradas que compõem os processos unitários podem ser, por exemplo, outros processos concernentes ao consumo de combustível, materiais de construção ou uso de infraestrutura rodoviária. Isso significa que as mudanças em fluxos de materiais ou processos influenciam as saídas e os resultados dos cálculos de fatores impactos. Para representar um sistema local, os processos são copiados e são realizadas mudanças nas cópias. As mudanças são feitas no consumo de insumos, fontes de energia e também com a troca dos subprocessos genéricos de fornecimento de energia e materiais por subprocessos locais (Weidema *et al.*, 2009).

Para o cálculo das saídas dos processos, é necessária a escolha de métodos de alocação de impactos. O método escolhido para a ACV esse estudo é o CML baseline, que considera os impactos mais comuns relacionados à acidificação de corpos hídricos, mudança climática, depleção de recursos naturais, toxicidade, eutrofização, depleção da camada de ozônio e oxidação fotoquímica (Acero *et al.*, 2017). Foram estudados na presente análise apenas os impactos relacionados à mudança climática.

➤ Avaliação, interpretação de ciclo de vida e análise crítica

A fase de avaliação consiste na associação dos resultados da etapa de inventário do ciclo de vida a fatores de impactos ambientais específicos. A avaliação do impacto de ciclo de vida passa por três fases, são elas:

- a) Classificação: Relacionar os dados do inventário às categorias de impacto mais pertinentes;
- b) Caracterização: Modelagem dos dados do inventário no contexto das categorias de impacto;
- c) Ponderação: Análise de sensibilidade, apresentação das incertezas.

A interpretação de ciclo de vida é relacionar os resultados da análise do inventário e da avaliação de impacto com o objetivo e escopo definidos a fim de identificar elementos e propor soluções e recomendações. Os resultados desta fase são destinados ao auxílio à tomada de decisão. Este processo envolve também a interpretação crítica e iterativa das fases anteriores, da natureza e qualidade dos dados coletados, e preferencialmente uma análise de sensibilidade.

A análise crítica é aplicada na ACV para garantir que os métodos usados para conduzi-la sejam consistentes com a ISO 14040, e também a validade técnica e científica dos métodos aplicados. Analisar criticamente o processo de ACV garante também que os dados usados são apropriados e razoáveis em relação ao objetivo do estudo, que as interpretações refletem as limitações identificadas e o objetivo do estudo e como consequência, que o relatório do estudo é transparente e consistente (ABNT, 2001).

A ACV pode ser aplicada na identificação de processos de alto impacto ambiental em uma cadeia produtiva e identificação de oportunidades de melhorias. Também pode ser aplicada no planejamento estratégico de instituições, na definição de suas prioridades, e possibilitar a otimização dos processos e projetos dentro do ciclo de vida do produto. Há

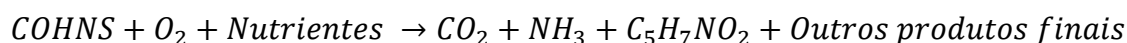
ainda a aplicação como base para estratégias de comunicação organizacional, por exemplo, em declarações ambientais de produtos e rotulagem ecológica (ABNT, 2004).

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para avaliar, através da ACV, os impactos associados às emissões de GEE, é necessário o estudo, por revisão bibliográfica, dos processos de tratamento de esgoto e gerenciamento de lodo, além dos impactos diretos e indiretos relacionados.

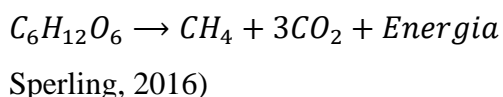
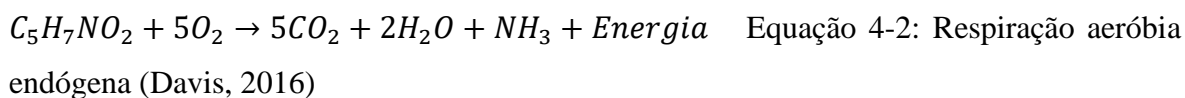
4.1 TRATAMENTO DE ESGOTO E GERENCIAMENTO DE LODO

O esgoto é um efluente com altas concentrações de poluentes que podem causar impactos na saúde humana e desequilíbrios nos ecossistemas: matéria orgânica, substâncias inorgânicas e microrganismos patogênicos (Jordão e Pessôa, 2005). Para redução dessas concentrações, o tratamento biológico em ETE executa um processo natural em alta taxa, a conversão da matéria orgânica presente no esgoto bruto em material celular microbiano. A conversão da matéria carbonácea por respiração aeróbia produz células novas, CO₂, amônia, água e energia (Equação 4-1; Equação 4-2). Em condições anaeróbias, a matéria orgânica é transformada em CH₄, CO₂ e energia (Equação 3-3). O material celular excedente do crescimento microbiano é então removido por processos de remoção de sólidos em suspensão.



Equação 4-1: Respiração aeróbia exógena (Davis, 2016).

(*COHNS*: matéria orgânica; *C₅H₇NO₂*: células novas)



Equação 4-3: Respiração anaeróbia (Von Sperling, 2016)

(*C₆H₁₂O₆*: Matéria orgânica)

O tratamento de esgoto inclui várias etapas, subdivididas em tratamento preliminar, tratamento primário, tratamento secundário e tratamento terciário. As primeiras unidades de uma ETE constituem o tratamento preliminar: gradeamento, para remoção de sólidos grosseiros e desarenador, para remoção de partículas inertes. O tratamento primário possui o objetivo de remover a maior parte das partículas em suspensão por meio de sedimentação em decantadores. O bom funcionamento dos tratamentos preliminar e primário é crucial para o bom funcionamento das etapas seguintes (Davis, 2016).

O propósito do tratamento secundário é remover a matéria orgânica (Demanda Bioquímica de Oxigênio, ou DBO) que não foi retida no tratamento primário, além da remoção de nitrogênio e fósforo. As unidades de remoção de DBO podem ser lagoas de tratamento (aeróbias, facultativas ou anaeróbias), reatores aeróbios e reatores anaeróbios. A remoção biológica de nitrogênio requer uma zona aeróbia e uma zona anóxica nos reatores, enquanto a remoção biológica de fósforo requer uma zona anaeróbia seguida por uma zona aeróbia. A exposição alternada a essas condições é realizada nos reatores do processo de tratamento biológico. O efluente do tratamento biológico é encaminhado à remoção secundária de sólidos em suspensão. Tendo em vista a necessidade de aumentar a remoção de sólidos em suspensão, a remoção de nutrientes e aumentar a eficiência da desinfecção, o tratamento terciário pode se dar em lagoas de maturação para remoção de patógenos, tanques de flotação, precipitação química, filtração, ou adsorção de carbono (Davis, 2016).

O tratamento de esgoto gera alguns subprodutos sólidos. São eles: material gradeado, areia, espuma, lodo primário (produzido nos decantadores primários), lodo secundário (produzido nas etapas biológicas do tratamento) e lodo químico se há alguma etapa físico-química. Para prevenção de impactos ambientais, são essenciais o tratamento e a destinação final adequada dos subprodutos sólidos do tratamento de esgoto, sendo que, devido ao maior volume e massa produzidos, a problemática dos lodos é mais abordada (Von Sperling, 2014).

O lodo bruto contém grande quantidade de patógenos, é putrescível e exala odores. O conteúdo de água no lodo é alto, e está presente nas seguintes formas, classificadas pelo método de separação: água livre (removida por flotação ou adensamento), água adsorvida (removida com uso de flocculante ou força mecânica), água capilar, e água celular (parte da fase sólida, removível por evaporação). A umidade do lodo de esgoto é de cerca de 95% na maior parte das etapas de tratamento. As propriedades mecânicas do lodo são influenciadas pela umidade, sendo que um lodo fluido possui entre 75% e 100% de umidade e um lodo semissólido, também denominado “torta” possui entre 65% e 75%. O teor de sólidos no lodo

é expresso pela concentração de sólidos secos, ou concentração de sólidos totais (ST). A densidade do lodo fluido é próxima à da água (1,02 a 1,03 kg/m³), enquanto a densidade do lodo desidratado varia entre 1,05 e 1,08 kg/m³ (Von Sperling, 2014).

A linha de tratamento de lodo é frequentemente apontada como a maior fonte de impactos ambientais de uma ETE (Parravicini *et al.*, 2016). O planejamento do gerenciamento do lodo abrange a quantificação da produção de lodo na fase líquida, a sua remoção da fase líquida para a linha de tratamento de lodo e o descarte de lodo para armazenamento ou destinação final adequada. As etapas do gerenciamento do lodo incluem:

- Adensamento: Processo preliminar de remoção da umidade, processo de aumento do teor de sólidos, redução da umidade e conseqüentemente, do volume;
- Estabilização: Remoção da matéria orgânica biodegradável (redução de sólidos voláteis) e conseqüente redução na massa de sólidos;
- Condicionamento: Preparação para a desidratação com uso de coagulantes ou polieletrólitos para melhorar a captura de sólidos;
- Desaguamento ou desidratação: Pode ser natural (evaporação) ou mecanizado (filtração, compactação ou centrifugação), trata-se da remoção da umidade para produzir lodos com comportamento mecânico sólido e reduzir o volume;
- Higienização: Necessária para destinação final na agricultura, pode ser realizada por adição de cal, tratamento térmico, ou compostagem;

Destinação final: Aplicação do lodo tratado (biossólido) na agricultura, ou recuperação de áreas degradadas, fabricação de lajotas, uso como combustível, incineração ou disposição final no aterro sanitário (Von Sperling, 2014).

O gerenciamento do lodo no Distrito Federal é feito pela CAESB e visa atender às normas pertinentes, a resolução CONAMA n° 375 de 29 de agosto de 2006 e a resolução CONAM/DF n° 03 de 18 de julho de 2006, que definem padrões para a concentração de patógenos e de substâncias tóxicas, a fim de regulamentar as possibilidades de disposição final ambientalmente adequada. As principais atividades de disposição ambientalmente adequada do lodo no DF são a recuperação de solos degradados e secagem por solarização. A CAESB aponta, em seu Relatório da Administração, que está em constante busca por outras tecnologias para adequação da qualidade dos lodos tratados, como secagem térmica, higienização alcalina, compostagem e solarização, para ampliar as opções de destinação final (CAESB, 2018).

Para o Distrito Federal, Batista (2015) aponta como opções viáveis de destinação final para o lodo a disposição em aterro sanitário, o uso agrícola, a recuperação de áreas degradadas, uso na silvicultura, produção de substrato vegetal ou o uso como matéria prima na fabricação de cerâmica vermelha. A disposição no aterro sanitário de Brasília constitui uma solução problemática por comprometer o tempo de vida útil do mesmo (GDF, 2018). O uso agrícola representa riscos à saúde humana e requer alta qualidade do biossólido, logo uma alta eficiência operacional na desinfecção, além de representar o risco de contaminação do solo e das águas subterrâneas com metais pesados (Doka, 2003b). Outras opções de destinação final do lodo não consideradas no estudo de Batista (2015) incluem a incineração e o coprocessamento na indústria cimenteira.

4.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DIRETOS ASSOCIADOS AO TRATAMENTO DE ESGOTO

O lançamento das esgoto não tratado em corpos d'água causa alterações da qualidade do corpo receptor. A matéria orgânica solúvel causa a depleção do oxigênio dissolvido e pode adicionar gosto e odor às águas de mananciais. Substâncias tóxicas e íons de metais pesados podem ser transferidos ao longo da cadeia alimentar. O lançamento de altas cargas de sólidos em suspensão pode adicionar cor e turbidez aos corpos hídricos, o lançamento de nutrientes (nitrogênio e fósforo) acelera o processo de eutrofização de ecossistemas lênticos, e ambos fatores trazem grandes prejuízos socioambientais por restringir os usos da água. Todos os impactos citados acontecem em menor intensidade com o lançamento dos efluentes das ETE, que possuem cargas residuais baixas de poluentes, e espera-se que esses impactos estejam abaixo da capacidade de recuperação do meio. O déficit no atendimento dos serviços de coleta e tratamento de esgoto doméstico é também uma causa de impactos na qualidade de vida da população, por e tratar de um efluente rico em microrganismos transmissores de doenças (Jordão e Pessôa, 2005).

O objetivo do tratamento de águas residuárias domésticas é converter o carbono e a energia em biomassa microbiana, que pode ser removida por sedimentação ou filtração. Os microrganismos incorporam nas novas células a matéria orgânica e nutrientes (N e P), prevenindo a depleção de oxigênio dissolvido e a eutrofização nos corpos receptores (Davis, 2016). O tratamento em ETE gera uma série de emissões diretas de GEE, associadas às etapas de tratamento biológico (IPCC, 2006). O metano é o principal GEE emitido durante o tratamento de resíduos, correspondendo a 95,1% das emissões em 2020. Nesse mesmo

ano, o óxido nitroso foi responsável por 4,9% e o CO₂ de origem não biogênica por 0,1% do total de emissões de GEE (MCTIC, 2020). O tratamento secundário aeróbio visa reproduzir em alta taxa a degradação dos poluentes que ocorre naturalmente nos corpos hídricos. As emissões de CO₂ decorrentes da degradação aeróbia das águas residuárias são biogênicas e não são consideradas nos inventários nacionais de emissões, de acordo com as diretrizes do IPCC (2006).

A conversão da matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio depende dos aceptores de elétrons disponíveis. Pode haver redução do nitrato (NO₃⁻), redução do sulfato (SO₄²⁻) ou formação de metano, que ocorre quando o CO₂ é o aceptor de elétrons. Não há formação de metano em ambientes com oxigênio, nitrato ou sulfato disponíveis. A digestão anaeróbia depende de um ecossistema onde diversos microrganismos interagem para converter matéria orgânica em metano (CH₄), gás carbônico (CO₂), água (H₂O), gás sulfídrico (H₂S) e amônia (NH₄), além de mais biomassa bacteriana (Chernicharo, 2007).

Naturalmente, a produção de metano acontece no sedimento dos corpos hídricos, no solo e no sistema digestivo de animais ruminantes. A digestão anaeróbia com formação de metano pode ser responsável pela mineralização de 5 a 10% de toda a matéria orgânica disponível no planeta (Chernicharo, 2007). Esgoto e lodos de esgoto podem ser uma fonte de CH₄ quando tratados por via anaeróbia ou por lançamentos irregulares em ambientes anaeróbios, ainda, também podem ser uma fonte de óxido nitroso (N₂O). A geração de metano é significativa em ambientes anaeróbios especialmente em países tropicais e em reatores não controlados, pois a quantidade de metano produzida depende do tipo de tratamento, da quantidade de matéria orgânica biodegradável presente no esgoto e é diretamente proporcional ao aumento da temperatura (IPCC, 2006).

A produção de óxido nitroso (N₂O) é associada à degradação de ureia, nitrato e proteínas. As emissões diretas desse GEE podem acontecer tanto durante o tratamento da fase líquida quanto nos corpos hídricos, após o lançamento de esgoto bruto ou esgotos tratados que não passaram por tratamento adequado (IPCC, 2006).

O fluxo de nitrogênio em uma ETE é complexo, pois esse elemento se apresenta em muitas formas durante o tratamento. Em resumo, o mesmo pode ser sedimentado no lodo primário, absorvido nas partículas do tratamento biológico ou incorporado na biomassa. Há a formação de uma série de moléculas nitrogenadas nos processos de nitrificação e desnitrificação (Doka, 2003b). Nitrificação é um processo aeróbio de conversão de amônia e outras moléculas nitrogenadas em Nitrato (NO₃⁻) e a desnitrificação ocorre apenas em

condições anóxicas e envolve a conversão biológica de nitrato em gás dinitrogênio (N₂). O óxido nitroso (N₂O) pode ser formado como um intermediário dos processos citados, sendo mais associado à desnitrificação (Davis, 2016).

4.3 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA PARA QUANTIFICAÇÃO DOS IMPACTOS

Desde o lançamento de diretrizes para construção dos inventários nacionais (IPCC, 2006), a comunidade científica se empenhou no desenvolvimento e aplicação de metodologias para o cálculo de emissões no setor de saneamento. Uma ferramenta extensivamente aplicada para esse fim é a Avaliação Ciclo de Vida (ACV).

A ACV é uma técnica de estudo dos aspectos ambientais e impactos potenciais associados ao ciclo de vida de um produto ou serviço. Essa avaliação é feita a partir de inventários que consideram a extração de matéria prima, a produção, a distribuição, a operação e terminam com a destinação final. Os impactos a serem analisados nesse tipo de avaliação podem ser categorizados em uso dos recursos, impactos na saúde humana e consequências ecológicas. Ferramentas de ACV podem fazer a quantificação dos potenciais de contribuição o aquecimento global (kg CO_{2e}), além da estimativa de outros tipos de impactos. A Figura a seguir esquematiza as etapas para realização da ACV: (i) Planejamento (definição do objetivo e escopo); (ii) Construção de Inventário de Ciclo de Vida (ICV); (iii) Avaliação de impacto (classificação, caracterização e estimativa dos impactos ambientais); (iv) Seleção da melhor alternativa (ABNT, 2001).

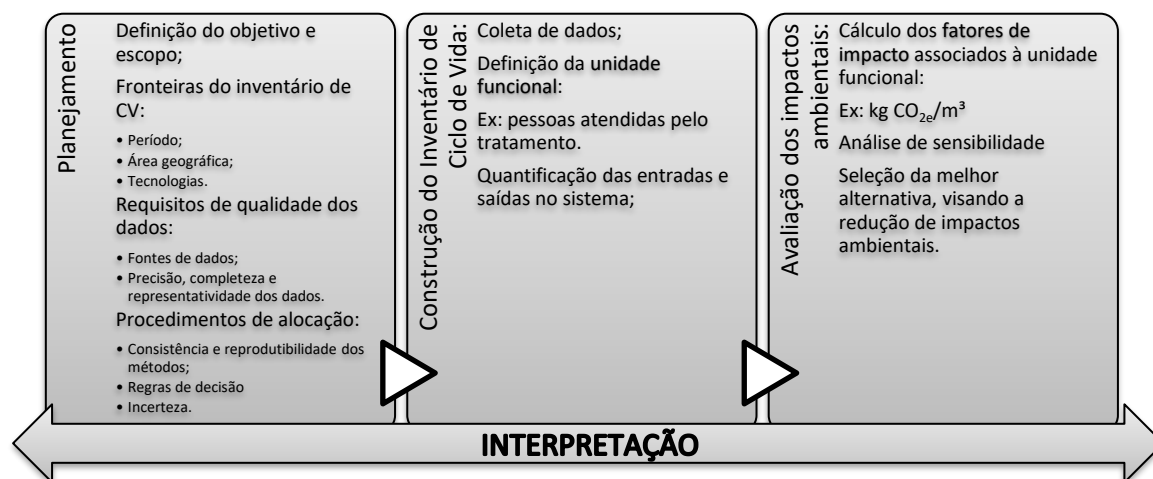


Figura 4-1: Etapas da ACV (ABNT, 2004; ISO, 1998).

Desde a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento – CNUMAD, ou Rio-92, houve aumento do interesse por técnicas de levantamento dos impactos ambientais de um produto ou mesmo um setor inteiro. A Rio-92 provocou grande

mobilização da opinião pública e foi bem sucedida em alertar os países quanto à urgência das mudanças climáticas. Nessa conferência foram assinados acordos ambientais que exercem influência política até hoje, como as Convenções do Clima e da Biodiversidade e a Agenda 21 (Moura, 2013). Em termos de produção científica, a aplicação da ACV tem sido progressiva desde os anos 1990, com aumento expressivo três anos antes e após a Conferência Rio+20. Esse fenômeno pode ser observado na Figura a seguir, que apresenta o número de publicações sobre ACV entre 1997 e 2020.

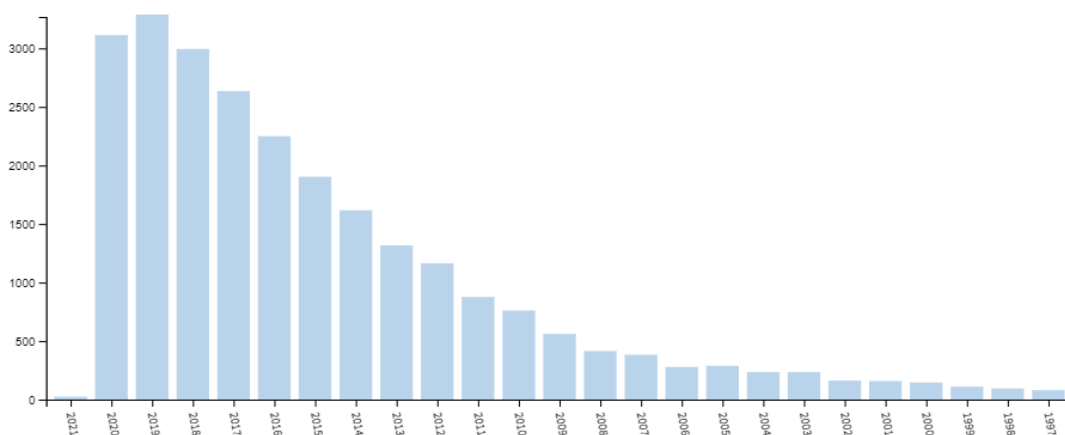


Figura 4-2 Número de publicações sobre ACV entre 1997 e 2020. (Web of Science, 2020).

Trata-se de importante ferramenta de desenvolvimento sustentável, não apenas para os Estados, mas também para a indústria. A ACV é uma técnica vantajosa por levar em consideração toda a cadeia de produção de um produto, por exemplo para um carro, desde a extração da matéria prima, passando pela produção, distribuição, operação (uso) e destinação final, enquanto uma abordagem que leva em conta apenas etapas do processo de consumo que se passam em um certo território consideraria apenas a operação dos veículos e subestimaria os impactos (Dao, *et al.*, 2018). Essa técnica possui vocação para análise do ciclo de vida (CV) de produtos, principalmente para comparar os impactos associados a duas opções que possuem a mesma função (Joseph *et al.*, 2015). Mas além dos produtos, pode ser utilizada para estimativa dos impactos de um serviço, por exemplo, a prestação de serviços de saneamento (Laurent *et al.*, 2014; Righi, *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2015). O quadro a seguir apresenta exemplos da aplicação dessa técnica em serviços de saneamento, especificamente de tratamento de esgoto ou produção de água potável.

Quadro 4-1: Aplicação da ACV no levantamento de impactos de estações de tratamento de água ou esgoto entre 2000 e 2017

AUTORES	PAÍS	METODOLOGIA	COMENTÁRIO
(LUNDIN ET AL., 2000)	Suécia	Avaliação de Ciclo de Vida	Comparação dos impactos ambientais derivados de duas soluções de tratamento de águas residuárias: Separação de urina e tratamento da água negra em processo de compostagem
(FRIEDRICH, 2002)	África do Sul	Avaliação de Ciclo de Vida	Cálculo e comparação dos impactos ambientais resultantes da aplicação de dois métodos de produção de água potável na África do Sul
(LYONS ET AL., 2009)	EUA	Avaliação de Ciclo de Vida	Comparação entre a captação de águas doces para tratamento em comparação à dessalinização. Conclui que a dessalinização causa mais impactos, no entanto a captação em mananciais de água doce apresenta impactos significativos.
(HONG ET AL., 2009)	Japão	Avaliação de Ciclo de Vida	Estimativa de impactos ambientais e econômicos de seis cenários alternativos de gerenciamento de lodo. Concluem que a digestão anaeróbia reduz os impactos ambientais, bem como os custos, por reduzir o volume de lodo. Apontam o desaguamento do lodo como uma operação de alto impacto. Estabelecem os cenários com incineração para destinação final como os de menores impactos.
(FOLEY ET AL., 2010)	Austrália	Inventário de Ciclo de Vida	Quantificação de impactos dos recursos consumidos e das emissões geradas em seis diferentes configurações de ETE

QUADRO 4-1, CONTINUAÇÃO: APLICAÇÃO DA ACV NO LEVANTAMENTO DE IMPACTOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA OU ESGOTO ENTRE 2000 E 2017

AUTORES	PAÍS	METODOLOGIA	COMENTÁRIOS
(RIGHI ET AL., 2013)	Itália	Avaliação de Ciclo de Vida	Estimativa dos impactos ambientais do gerenciamento descentralizado de resíduos sólidos orgânicos e lodos de esgoto por meio de unidades de digestão anaeróbia.
(NIERO ET AL., 2014)	Dinamarca	Avaliação de Ciclo de Vida	ACV comparativa de quatro tipos de ETE. Cálculo das compensações ambientais em diferentes cenários de destinação final do lodo por meio do cálculo dos impactos evitados.
(PARRAVICINI ET AL., 2016)	Áustria	Análise de emissões de carbono com fatores de emissão retirados da literatura	Estimativa das emissões diretas e indiretas de GEE em ETE. Concluíram que a maior fonte de óxido nitroso nas ETE é o tratamento por lodos ativados, com remoção moderada de nitrogênio. A maior fonte de emissão de metano são os digestores anaeróbios de lodo e os tanques de armazenamento de lodo.
(MCNAMARA ET AL., 2016)	Irlanda	Avaliação de Ciclo de Vida	Estudo dos efeitos de variações da escala das ETE nos impactos ambientais. Conclui que o consumo de energia e a aplicação do lodo no solo são os processos que causam mais impactos.
(RAGHUVANSHI ET AL., 2017)	Índia	Avaliação de Ciclo de Vida	Avaliação de ciclo de vida de uma ETE. Conclui que a reciclagem do efluente tratado constitui uma compensação ambiental.

A aplicação da ACV a pequenos sistemas, como uma ETE ou uma ETA, é uma abordagem *bottom-up*. A abordagem *top-down*, de escala global, pode ser demasiadamente genérica para a identificação de gargalos e definição de mudanças em sistemas de pequena

escala. Já a abordagem *bottom-up*, de escala local, admite que mudanças globais vêm da diminuição dos pequenos impactos. A abordagem *bottom-up* para ACV é implementada no mapeamento e análise de operações e processos em sistemas produtivos de pequena escala, e fornece um maior potencial de identificação de sensibilidades e de implementação de mudanças para impactos positivos (Girod & de Haan, 2010).

5 METODOLOGIA

Com o objetivo de aplicar a técnica de ACV à ETEBN, o programa OpenLCA com a base de dados EcoInvent 3.6 foi utilizado como ferramenta de cálculo dos fatores de impacto. Foi utilizado, para modelagem do inventário, os fluxos de entradas e saídas nas etapas do tratamento, o programa STAN 2.6.801. As distâncias percorridas para transporte de lodo foram calculadas com o *Google Maps*. Os mapas de localização foram elaborados no Qgis com a base de dados do Geoportal-DF (Infraestrutura de Dados Espaciais IDE-DF, 2020). Em suma, as seguintes etapas foram executadas: Definição das fronteiras do sistema, inventários de ciclo de vida, cálculo dos fatores de impacto, estimativa dos impactos e comparação de alternativas.

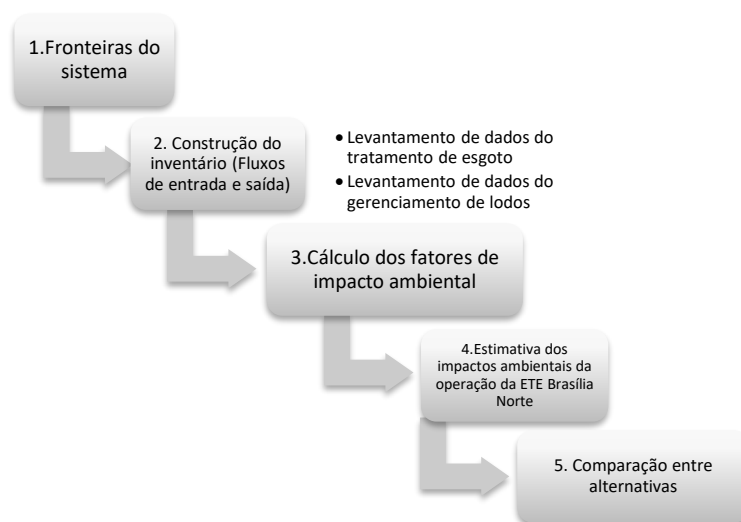


Figura 5-1: Etapas de ACV aplicadas à ETE Brasília Norte

5.1 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Primeiramente foram delimitadas as fronteiras do sistema, que são apresentadas a partir de mapas de localização e situação. Para a construção do inventário, os dados operacionais da ETE Brasília Norte foram levantados com base na tese de mestrado de Batista (2015), no Plano Distrital de Saneamento Básico (Governo Do Distrito Federal, 2017) e nos relatórios anuais de desempenho da Companhia de Águas e Esgoto do Distrito

Federal (CAESB, 2018; CAESB, 2020). Com base nos dados levantados, foram construídos quatro cenários, o cenário vigente em 2013, e três cenários com diferentes alternativas de tratamento e disposição final do lodo.

O cálculo dos fatores de impacto foi realizado na plataforma *OpenLCA*, a partir da escolha de processos da base de dados EcoInvent 3.6 semelhantes aos processos delimitados no inventário. Por exemplo, para o tratamento de esgotos em uma ETE, o processo escolhido foi copiado, e na cópia foram feitas as alterações necessárias para modelar o funcionamento da ETEBN.

A Figura a seguir é uma captura de tela do processo que modela uma ETE. A primeira coluna contém os fluxos de material de entrada no sistema, a segunda coluna a categoria do fluxo, a terceira a quantidade de material que entra no sistema, acompanhada da unidade de medida. Na coluna Provider, cada linha é um outro processo, um subprocesso que se refere ao ciclo de vida de materiais ou infraestrutura que compõem a ETE. As quantidades de insumos químicos e energia utilizados para a operação da ETE foram levantados no inventário e ajustados no processo copiado. Os subprocessos genéricos relacionados ao consumo de energia elétrica, combustíveis, e água potável são trocados por subprocessos brasileiros. Os subprocessos de consumo de insumos são adaptados para a realidade nacional com a elaboração de cópias e troca da matriz energética genérica para a matriz brasileira. O mesmo foi feito para os processos de tratamento de lodo.

Flow	Category	Amount	Unit	Provider
F _e chemical, inor...	201:Manufacture ...	7.70170E-7	kg	P chemical production, inorganic chemical, inorganic Cutoff, U (copy) - C
F _e chemical, orga...	201:Manufacture ...	6.14680E-7	kg	P market for chemical, organic chemical, organic Cutoff, U (copy) - GLO
F _e chromium oxi...	201:Manufacture ...	0.00000	kg	P market for chromium oxide, flakes chromium oxide, flakes Cutoff, U - G
F _e electricity, high...	351:Electric powe...	0.61528	kWh	P market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - B
F _e electricity, low ...	351:Electric powe...	0.48981	kWh	P market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - BR,
F _e heat, district or...	351:Electric powe...	0.00000	MJ	P market for heat, district or industrial, natural gas heat, district or industria
F _e heat, district or...	353:Steam and air...	0.00000	MJ	P market for heat, district or industrial, other than natural gas heat, district
F _e hydrochloric a...	201:Manufacture ...	0.00000	kg	P market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state hydroc

Figura 5-2: Captura de tela do *OpenLCA*. Fluxos de entrada no processo da base de dados EcoInvent 3.6 que modela o tratamento em uma ETE

Após a criação da cópia e adaptação das entradas no sistema para a realidade local, é então criado um sistema do produto. O cálculo do fator de impacto é feito no sistema do

produto, após definição da unidade de referência, seja para uma ETE, um m³ de esgoto afluente.

The image shows a software interface with two main sections: 'General information' and 'Reference'.
In the 'General information' section, there is a 'Name' field with the text 'treatment of wastewater, average, capacity 4.7E10l/year | wastewater, average | Cutoff, U (copy)'. Below it is a 'Description' field containing 'First created: 2020-12-13T20:29:06' and 'Linking approach during creation: Prefer default providers; Preferred process type: System process'. There are also fields for 'Version' (00.00.000), 'UUID' (9dbc38b3-e49d-469c-a51d-ea8da9a70dfb), and 'Last change' with a 'Calculate' button.
The 'Reference' section contains several dropdown menus: 'Process' (treatment of wastewater, average, capacity 1.1E10l/year | wastewater, average | Cutoff, U (copy) - BR-DF), 'Product' (wastewater, average), 'Flow property' (Volume), and 'Unit' (m3). A 'Target amount' field is set to 1.0.
At the bottom, there are tabs for 'General information', 'Parameters', 'Model graph', and 'Statistics'.

Figura 5-3: Sistema do produto referente a uma ETE.

Nas definições de cálculo, é solicitada uma análise com o método de avaliação de impacto CML-IA baseline, com análise de sensibilidade e tipo de agregação por pesos:

The image shows a dialog box titled 'Calculation properties' with the following settings:
- Allocation method: As defined in processes
- Impact assessment method: CML-IA non-baseline
- Normalization and weighting set: (empty)
- Calculation type: Analysis (selected), Quick results, Regionalized LCIA, Monte Carlo Simulation
- Include cost calculation: (unchecked)
- Assess data quality: (checked)
At the bottom, there are buttons for '< Back', 'Next >', 'Finish', and 'Cancel'.

Figura 5-4: Definição das propriedades de cálculo no *OpenLCA*

O cálculo apresentado retorna uma série de resultados, entre eles os fatores de impacto e os sub-processos que mais contribuem para o impacto em questão. As unidades

de referência dos fatores de impacto são definidas nos processos da base de dados. Para o tratamento de esgoto, os impactos apresentados nos resultados dos cálculos se referem a um m³ de esgoto afluente à ETE. Para as unidades de adensamento e desaguamento mecanizado do lodo as unidades de referência dos processos da base de dados são um kg de lodo afluente ao adensamento e um kg de lodo afluente à desidratação, portanto para o cálculo dos impactos resultantes, os fluxos de volume de lodo apresentados por Batista (2015) foram multiplicados pela densidade média do lodo apresentada por Von Sperling (2014): 1,02 kg/m³ para o lodo fluido e 1,08 kg/m³ para o lodo adensado. Para o transporte do lodo, o processo que modela o uso de um caminhão tem como unidade de referência uma tonelada de lodo transportado em um quilômetro (t/km). Para a incineração do lodo em unidades de incineração ou coprocessamento no forno rotativo a unidade de referência é um kg de lodo incinerado.

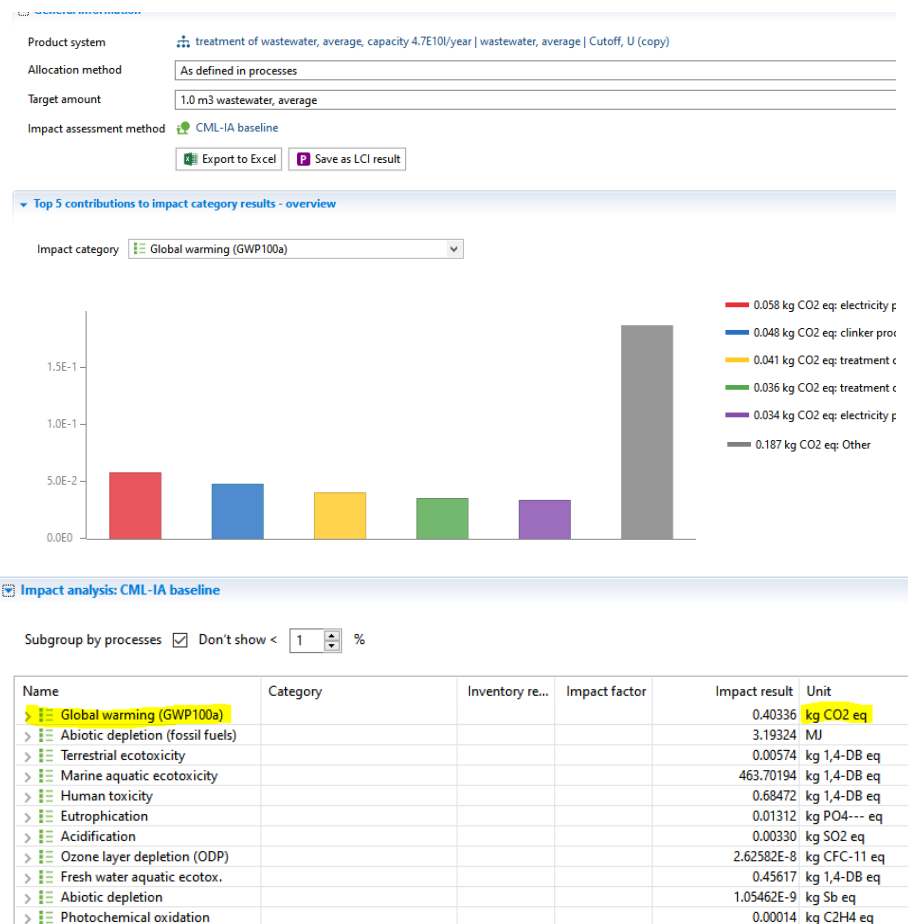


Figura 5-5 Resultados do cálculo de fatores de impacto em uma ETE pelo método CML-IA baseline no Software *OpenLCA*

Os resultados do levantamento de inventário são os fluxogramas de volume de esgoto e lodo entre os processos e operações considerados dentro das fronteiras do sistema. Esses

fluxogramas esquematizam as entradas e saídas em cada processo a ser modelado nos cenários. O programa STAN 2.6.801 foi utilizado para elaboração desses fluxos. Para cálculo do impacto total os fatores de impacto foram multiplicados pelos fluxos determinados nos inventários, de acordo com a equação 4-1. Para a apresentação dos resultados de acordo com a unidade funcional, os impactos totais foram divididos pela quantidade de pessoas atendidas pela ETEBN, ou seja, número de pessoas-equivalente.

5.2 ESTUDO DE CASO

5.2.1 Fronteiras do sistema - Área de estudo

O sistema de tratamento de esgoto no Distrito Federal possui quinze estações de tratamento de esgoto, nove das quais possuem tratamento a nível terciário. A ETE mais antiga do DF é a ETE Sobradinho, que teve início de operação em 1967. Desde então, a maioria das ETE do DF foram inauguradas e reformadas entre 1990 e 2003, quando foi iniciada a operação da ETE Melchior em Samambaia (Governo Do Distrito Federal, 2017). A Figura a seguir apresenta a localização das ETE do Distrito Federal:

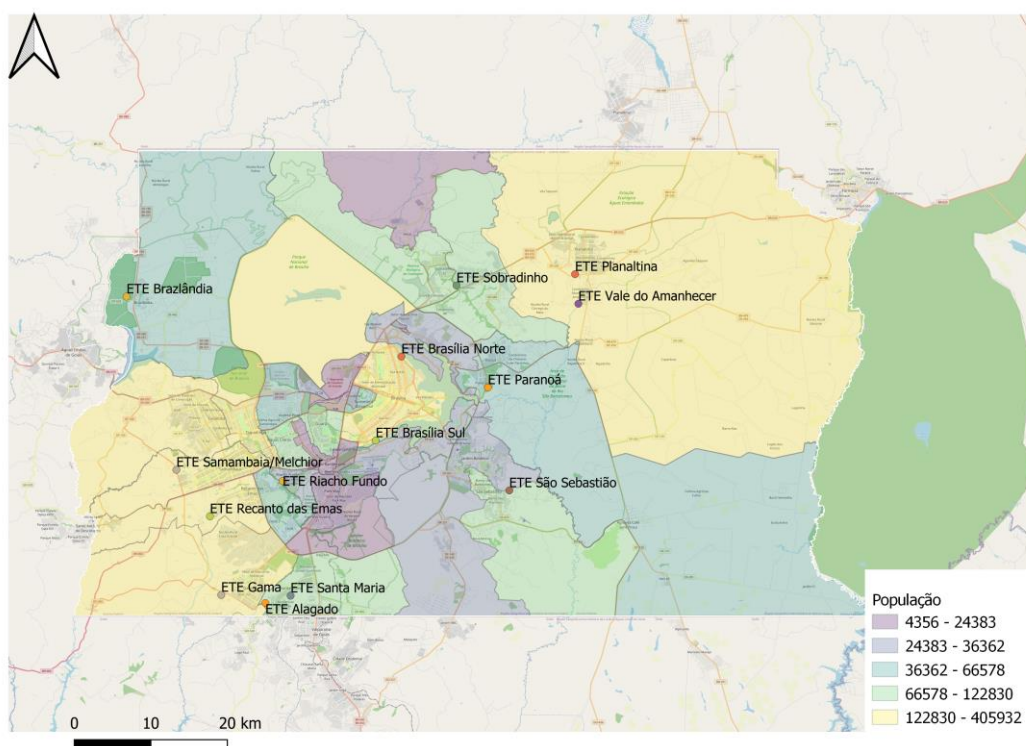


Figura 5-6: Localização das estações de tratamento de esgotos do DF

Quanto à vazão de projeto, apresentada na Figura a seguir, as maiores ETE do DF são respectivamente a ETE Brasília Sul, a ETE Melchior e a ETE Brasília Norte, todas

localizadas nas regiões mais populosas do Distrito Federal. Em razão da disponibilidade de dados operacionais na tese de Batista (2015), e da impossibilidade de realização de visitas técnicas durante a pandemia do COVID-19, a ETE Brasília Norte foi selecionada como objeto do presente estudo.

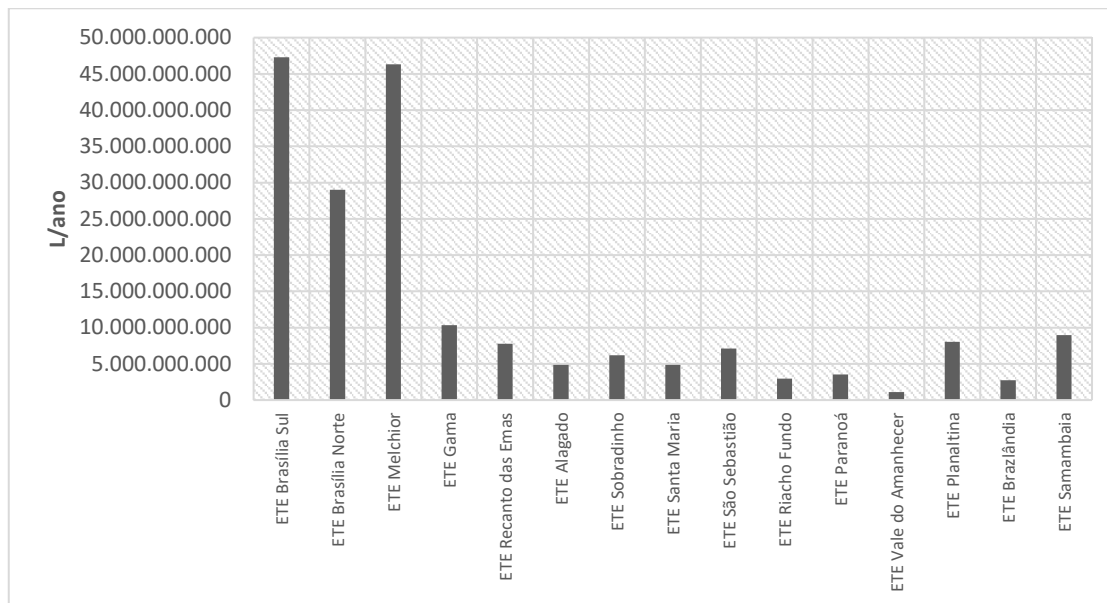


Figura 5-7: Vazões de projeto das ETE do DF. Fonte: CAESB, concessão de dados via Lei de Acesso à Informação em 2019

A ETEB Norte foi inaugurada em 1969 com tratamento secundário por lodos ativados convencional. Nos anos 1990, para remediar o processo de eutrofização de seu corpo receptor (Lago Paranoá), foi adaptada para realizar o tratamento avançado (terciário, remoção de fósforo e nitrogênio) e teve sua capacidade ampliada para tratar uma vazão de projeto igual a 920 L/s. Após as adaptações seu processo compreendia, portanto, o tratamento preliminar, o tratamento primário, os tratamentos secundário e terciário, além do tratamento da fase sólida. A ETEBN atende uma população de projeto igual a 260.000 habitantes residentes da Vila Planalto, parte da área central de Brasília, Asa Norte, Vila Varjão, parte do Lago Norte e Vila Estrutural (Governo Do Distrito Federal, 2017). A Figura a seguir apresenta em laranja a área de contribuição atendida pela ETEBN.

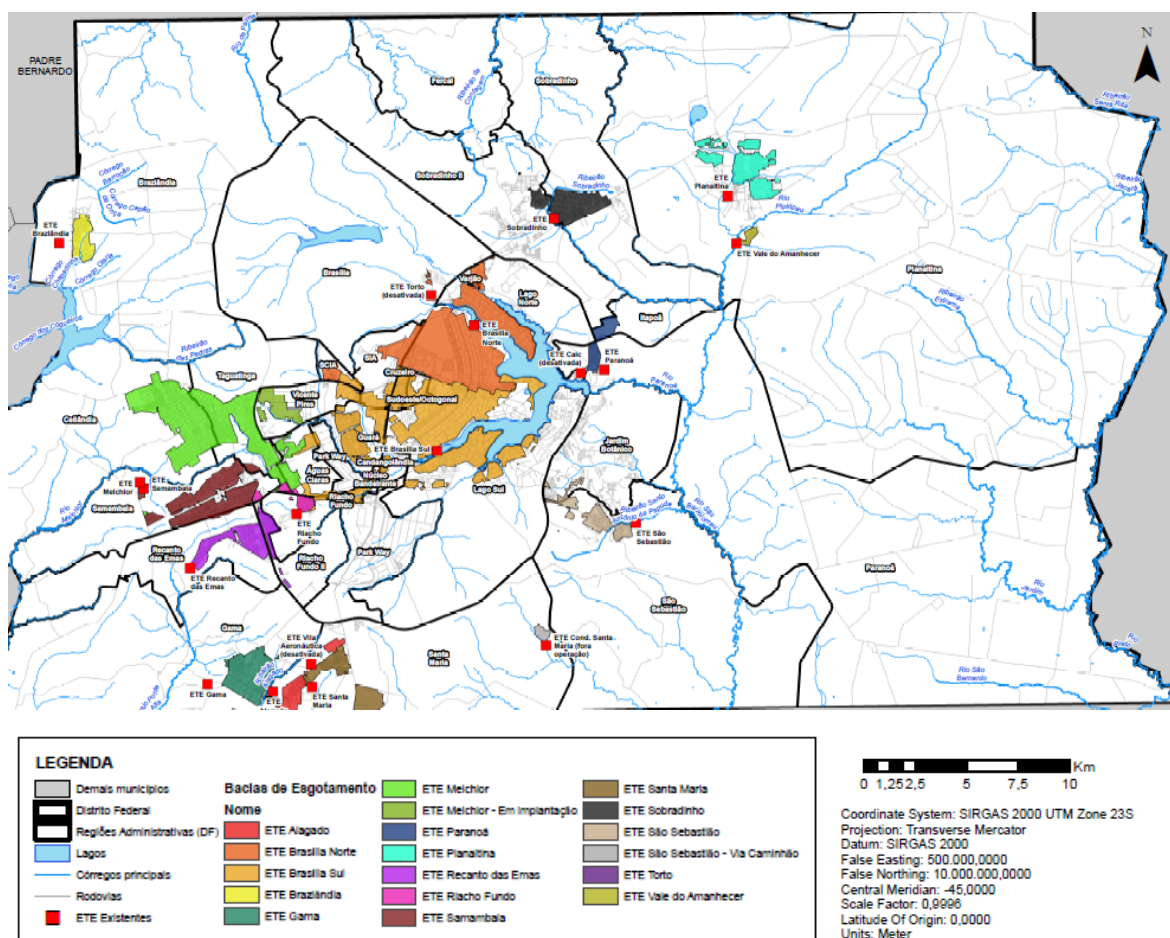


Figura 5-8: Localização das bacias de esgotamento das ETE do DF. Fonte: Plano Distrital de Saneamento Básico (2017)

A Estação de Tratamento de Esgoto Brasília Norte está situada na Via L4 (Estrada Parque das Nações – DF004), na bacia hidrográfica do Lago Paranoá, no norte da Região Administrativa Plano Piloto, região central do Distrito Federal, em Zona Urbana do Conjunto Tombado. A localização da ETEBN é apresentada no mapa a seguir, que descreve também a situação do empreendimento quanto à hidrografia da região.

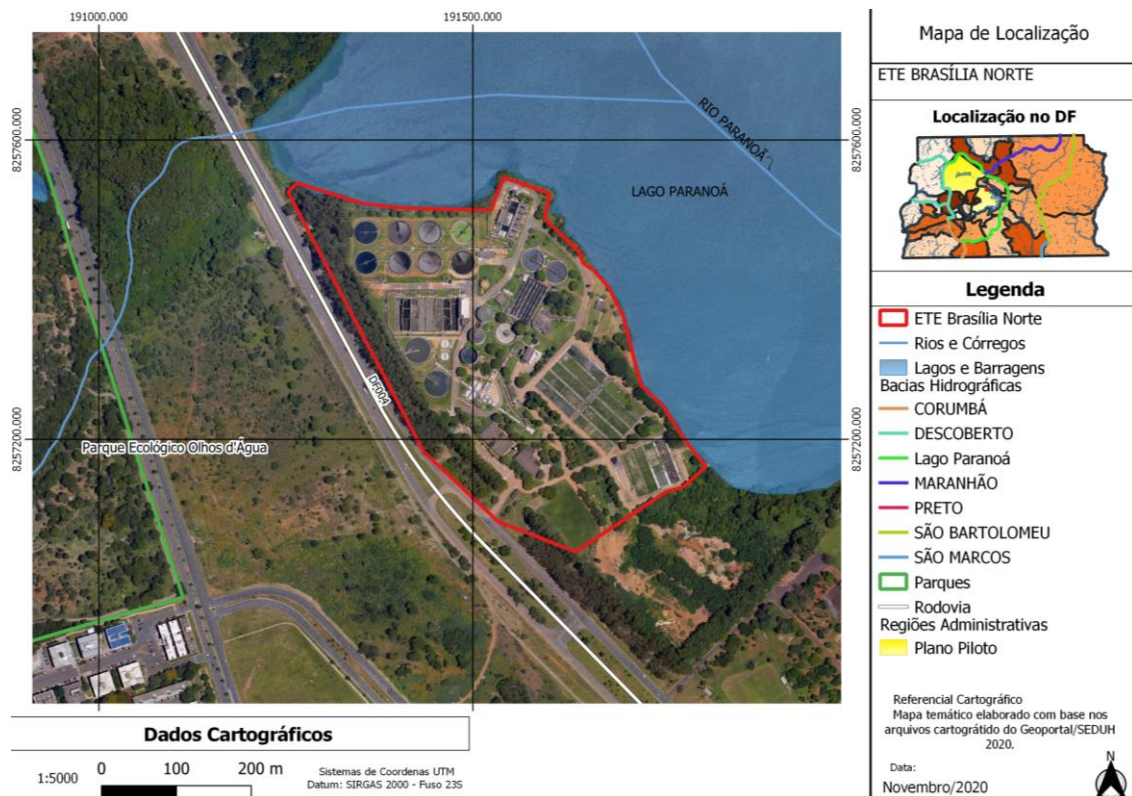


Figura 5-9 - Localização da ETE Brasília Norte

Quanto ao zoneamento ambiental, a ETEB Norte se situa na Área de Proteção Ambiental (APA) do Lago Paranoá, o corpo receptor do efluente tratado. Ainda, parte das unidades da ETE estão na Área de Proteção Permanente (APP) do Lago Paranoá. Esse corpo hídrico apresenta histórico de eutrofização, processo que foi amenizado a partir da inauguração das unidades de tratamento terciário na ETEB Norte e na ETEB Sul, que lançam seus efluentes tratados no Lago Paranoá (GDF, 2017). Resta ainda a necessidade de monitoramento dos processos que possam acelerar a eutrofização do lago, o acompanhamento das cargas de N e P no efluente tratado, além da prevenção de vazamentos nas redes hidráulicas e de extravasamentos nas unidades das ETE Brasília (ADASA, 2016). A ACV pode ser uma ferramenta de predição das cargas de PO_4 lançadas no Lago Paranoá, visto que alguns métodos de cálculo dos impactos retornam estimativas da contribuição para a eutrofização.

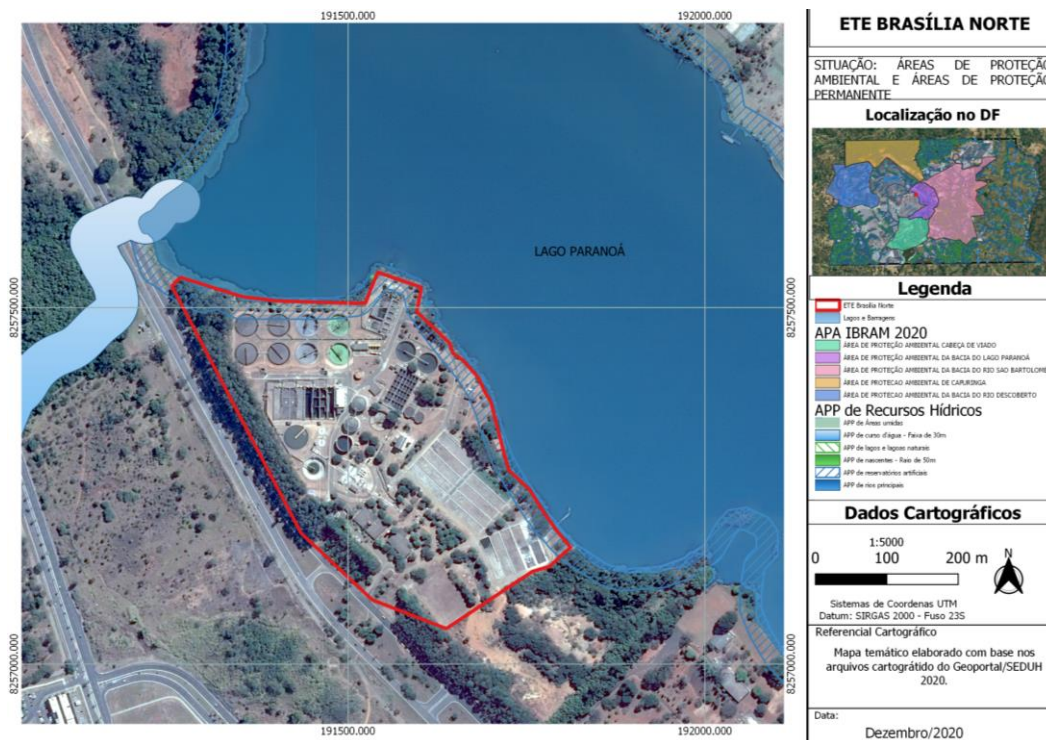


Figura 5-10: Situação da ETEB Norte quanto à APA e APP

Desde a reforma da ETEBN, houve evolução urbana em sua bacia de esgotamento, com novas ocupações na Vila Estrutural, no Plano Piloto, Asa Norte, e Varjão. A bacia de contribuição é apresentada com maior nível de detalhe na Figura a seguir, com a representação da evolução urbana entre 1958 e 2019.

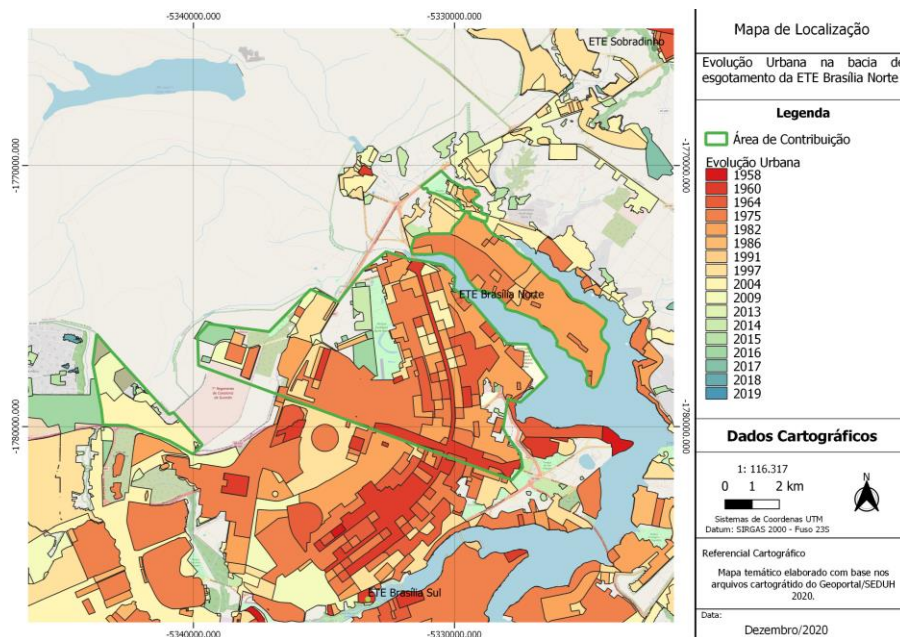


Figura 5-11: Mapa de localização da bacia de esgotamento da ETEBN, com evolução da ocupação urbana

5.2.2 Tecnologias do inventário: tratamento da fase líquida

Em 2013 a ETEB Norte recebia uma vazão média afluyente de 479 L/s, inferior à vazão de projeto, porém com picos de vazão diários que a excediam (Batista, 2015). O tratamento biológico aeróbio da ETEB Norte conta com remoção de nitrogênio, seguido de polimento final com precipitação de fósforo. Essa ETE possui gradeamento manual e mecanizado, dois desarenadores circulares, dois decantadores primários, quatro reatores biológicos, oito decantadores secundários e seis tanques de polimento final, além da Estação de Tratamento de Lodo (ETL) (GDF, 2017). A Figura a seguir esquematiza as etapas de tratamento da ETEBN.

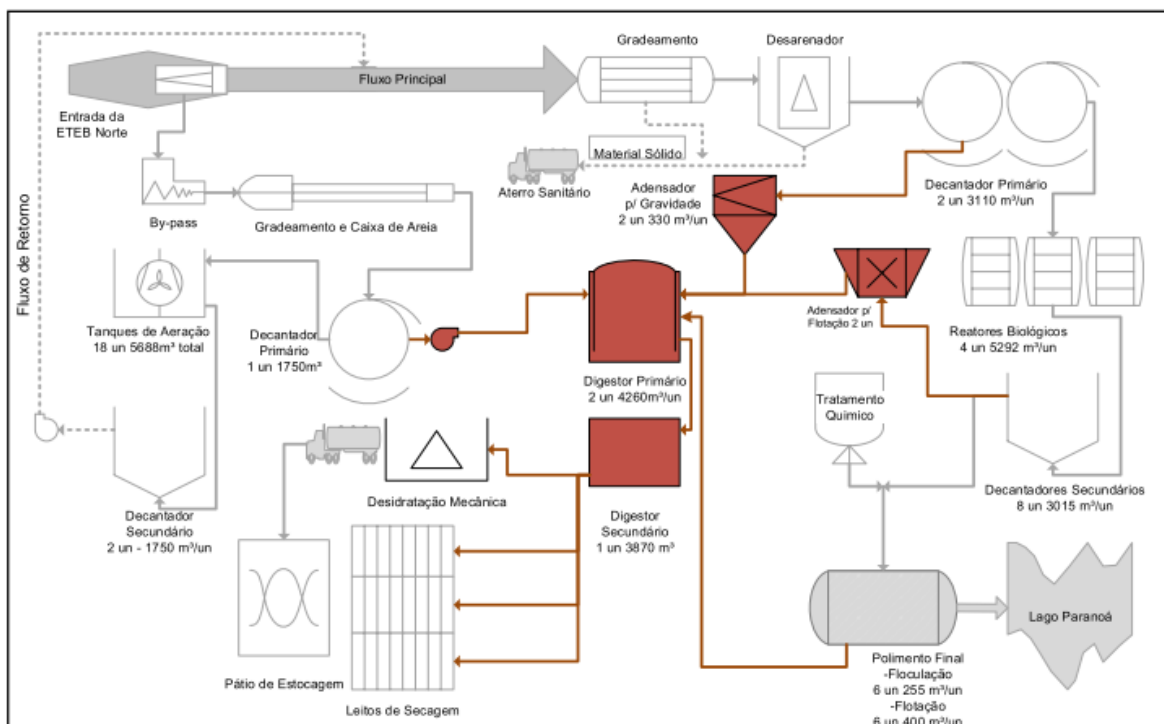


Figura 5-12: Fluxograma de tratamento de Águas residuárias na ETEB Norte, ETL em destaque vermelho (Batista, 2015).

5.2.3 Tecnologias do inventário: tratamento da fase sólida na ETL

O lodo primário é produzido nos decantadores primários, portanto, é composto pelos sólidos sedimentáveis do esgoto bruto. O lodo secundário, também denominado lodo biológico ou lodo excedente, é produzido na etapa biológica do tratamento, constituído em grande parte pela biomassa que consumiu a matéria orgânica do esgoto afluyente. A depender do tipo de tratamento, os lodos biológicos distinguem-se ainda entre lodos aeróbios não estabilizados, lodos aeróbios estabilizados e lodos anaeróbios (estabilizados). Em sistemas que utilizam etapas físico-químicas para aprimorar a remoção de sólidos, produz-se o lodo

químico. O lodo tratado que se enquadra nas condições físico-químicas adequadas para uso na agricultura pode ser denominado biossólido, como forma de ressaltar seus potenciais usos produtivos (Von Sperling, 2014). O fluxograma da ETL na ETE Brasília Norte é apresentado na Figura a seguir, a representação do fluxo de volume médio diário de lodo entre as operações e processos de tratamento de lodos na ETEB Norte em 2013. A linha tracejada representa os limites do sistema de tratamento de lodos. As setas representam o fluxo de lodo em volume (m³) e sua espessura é proporcional ao valor do fluxo. A letra I identifica o fluxo como de Importação e a letra E identifica o fluxo como de Exportação

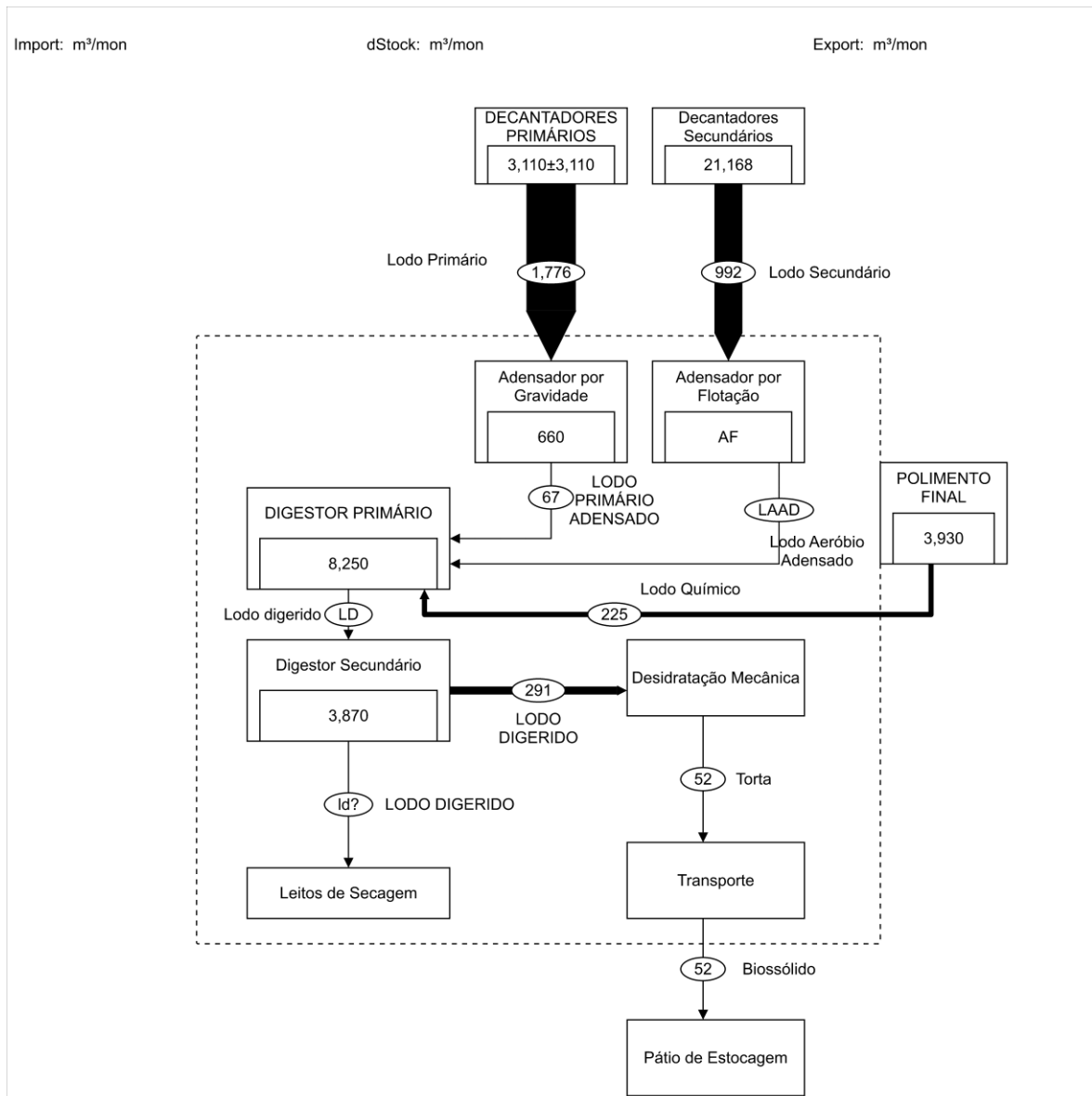


Figura 5-13 Fluxo médio diário de lodo em m³ nas etapas de tratamento da fase sólida na ETEB Norte em 2013 (Batista, 2015). Elaborado no programa STAN 2.6.801

➤ DECANTADORES PRIMÁRIOS

Processo de tratamento primário, tem por objetivo a separação dos sólidos suspensos (fase sólida do esgoto afluente) da fase líquida. Tem importante papel de redução da carga orgânica afluente ao tratamento biológico. A ETEB Norte possui decantadores primários circulares com pontes raspadoras e descarte automatizado de lodo de fundo (Batista, 2015).

➤ ADENSADOR POR GRAVIDADE

Adensadores por gravidade são usualmente circulares, com alimentação central, saída de lodo pelo fundo e saída do sobrenadante pelas bordas da circunferência. Em 2013 apenas um dos dois adensadores da ETEB Norte estava em funcionamento, esse processo recebia apenas o lodo e a espuma do decantador primário e opera pelo princípio da sedimentação por zona, onde o lodo é concentrado no fundo. O descarte do lodo adensado era manual e o volume e frequência de descarte eram definidos empiricamente. O lodo adensado resultante possuía nesse ano em média 5,06% de sólidos totais, uma média que variou entre 4,92 e 5,62% entre 2008 e 2014 (Batista, 2015).

➤ DIGESTOR PRIMÁRIO ANAERÓBIO

A digestão anaeróbia é o processo de estabilização de lodos mais utilizado no Brasil. Trata-se de um processo de estabilização biológica da fração biodegradável da matéria orgânica presente no lodo, em ambiente livre de oxigênio molecular. Esse procedimento favorece a digestão anaeróbia do material celular da biomassa, a partir de um longo tempo de retenção, reduzindo o risco de putrefação, os odores e a concentração de patógenos. O subproduto desse processo pode ser utilizado com restrições na agricultura após desaguamento, como condicionador de solo ou fertilizante e sem restrições após passar por higienização. Digestores anaeróbios são construídos em concreto ou aço e recebem o lodo bruto em mistura com o gás, que é coletado e armazenado em gazômetros para processamento ou queima, enquanto o sobrenadante é coletado e retornado ao tratamento na ETE e o lodo digerido é retirado por descarga no fundo (Von Sperling, 2014).

A ETEBN possui dois digestores anaeróbios primários e um digestor anaeróbio secundário. Os digestores primários recebem o lodo primário adensado em batelada e os lodos aeróbio e químico de forma contínua, um volume diário 30% acima do proposto no projeto. Essas unidades possuem três bombas para recirculação interna do lodo de fundo. O sistema de recirculação possui ainda uma rede de sucção e rede de recalque para retornar o

lodo ao topo do digestor. A transferência do lodo tratado ao digestor secundário pode acontecer em até 24h para ceder volume ao próximo período de produção de lodos. Segundo Batista (2015) as remoções médias de SV nos digestores anaeróbios da ETEB Norte variam entre os seguintes valores entre 2008 e 2014: 56% (2008); 39% (2009); 41% (2010); 48% (2011); 43% (2012); 39% (2013); 39% (2014).

➤ DIGESTOR SECUNDÁRIO

Originalmente, os digestores primários receberiam apenas os lodos primários e o lodo secundário seria direcionado a digestores aeróbios e posteriormente ao digestor secundário. Em 2000, o digestor aeróbio de lodos foi desativado e todo o lodo produzido na ETEBN é direcionado aos digestores primários e em seguida ao digestor secundário para complementar o tratamento. O lodo se concentra no fundo dessa unidade e é direcionado por bombeamento ao sistema de desaguamento de lodo ou aos leitos de secagem. Problemas de manutenção foram descritos por Batista (2015) como prejudiciais ao funcionamento dessa unidade.

➤ ADENSAMENTO POR FLOTAÇÃO

A unidade de polimento final tem o objetivo de remover nutrientes e matéria orgânica no efluente do tratamento biológico por floculação e flotação com o uso de sulfato de alumínio para coagulação das partículas e polieletrólito aniônico como floculante. Esse processo gera lodo químico com a separação da fase sólida por flotação a partir da dispersão de ar na massa líquida com uso de compressores e difusores. O adensamento por flotação se dá a partir da injeção de ar na mistura floculada, a adesão das bolhas de ar nas partículas provoca a diminuição da sua densidade, facilitando sua flutuação até a superfície para coleta. O lodo flotado é recolhido por raspadores superficiais e armazenado em um poço de lodo. Essa unidade recebe por bombeamento o efluente do tratamento aeróbio (Batista, 2015).

➤ DESIDRATAÇÃO MECÂNICA

A desidratação é crucial para a redução dos custos de transporte por diminuir o volume e melhorar as condições de manejo do lodo, aumentar o poder calorífico para incineração e reduzir a produção de lixiviados quando da disposição em aterros sanitários (Von Sperling, 2014). Os principais processos para desidratação mecanizada são centrífugas, prensas desaguadoras ou filtros prensa.

Para otimização do processo de desaguamento por meio do favorecimento da formação de flocos (captura de sólidos), podem ser utilizados produtos químicos (coagulantes metálicos ou polieletrólitos) ou processos físicos (aquecimento). Os polímeros podem ser utilizados como coagulantes ou auxiliares de floculação e são compostos orgânicos sintéticos de alto peso molecular que, dependendo da carga superficial predominante, podem ser classificados em catiônicos, aniônicos ou não iônicos (Von Sperling, 2014).

Na ETEBN, durante o recalque do lodo digerido à unidade de desaguamento é feito o condicionamento com polímero catiônico, na forma de solução preparada em processador automático, com concentração de 0,29%. A desidratação mecânica do lodo na ETE Brasília Norte era realizada por prensa de esteira em 2013, em paralelo a leitos de secagem que eram utilizados apenas em situações de contingência. Nessa unidade o lodo digerido passa por uma zona de separação por peneiramento, em seguida por uma zona de baixa pressão e uma zona de alta pressão, gerando lodo prensado, que é encaminhado por uma correia transportadora para caminhões basculante que realizam seu transporte ao armazenamento ou à disposição final. O efluente líquido da desidratação é recirculado para o tratamento da fase líquida e condicionado com uma suspensão de hidróxido de cálcio hidratada (cal), que se combina com o fósforo, precipitado na forma de fosfato de cálcio. O consumo do polímero depende da concentração de sólidos no lodo afluente e variou entre 5,78 e 6,17 kg/ton de massa seca entre 2008 e 2011, e em 2013 foi 8,85 kg por tonelada de massa seca (Batista, 2015).

5.2.4 Hipóteses para o cálculo dos fatores de impacto

➤ Quantificação dos impactos diretos

Uma parte do carbono do esgoto é removida no decantador primário na forma de lodo primário. Outra parte é removida no tratamento biológico, transformada em biomassa ou por oxidação para CO₂. A taxa de transferência de carbono considerada no processo de tratamento de esgoto da base de dados é a seguinte: 58% do carbono afluente à etapa de tratamento biológico é transferido ao lodo biológico e 42% é removido como CO₂ de origem biogênica (Doka, 2003b).

As emissões decorrentes do tratamento de esgoto foram quantificadas no OpenLCA em processo que calcula as emissões indiretas, pois as emissões diretas do reator aeróbio são consideradas biogênicas (IPCC, 2006). As emissões diretas decorrentes do tratamento de

lodo se originam na etapa de digestão anaeróbia do lodo e são quantificadas no OpenLCA por equações, a partir da composição do esgoto apresentada na Tabela 0-1.

Parravicini et al. (2016) apontam que a maior parte das emissões de metano em uma ETE derivam do tratamento da fase sólida. Os autores converteram as emissões de CH₄ no fator de contribuição para o aquecimento global em 100 anos com uso do coeficiente 25 kg CO₂e por kg de CH₄ emitido. Nesse estudo os autores utilizam um fator de emissão igual a 6% do carbono orgânico dissolvido degradado no reator e apontam ainda que os fatores de emissão de CH₄ em digestores anaeróbios na literatura variam entre 0% e 11% do carbono orgânico dissolvido degradado.

➤ Quantificação dos impactos indiretos

- Consumo de energia

O consumo de energia elétrica foi estimado a partir de indicadores publicados pela CAESB anualmente. São eles:

- ES028 - Consumo total de energia elétrica nos sistemas de tratamento (1000 kWh/ano): Quantidade anual de energia elétrica consumida nos sistemas de esgotamento sanitário, incluindo todas as unidades que compõem os sistemas, desde as operacionais até as administrativas. Dados oriundos das faturas de energia elétrica;
- PA01b - Consumo de energia nas estações elevatórias de esgoto (kwh): Energia total consumida no período considerado. Corresponde à soma do consumo real de todo equipamento de bombeamento de Águas residuárias do sistema.
- ES006 - Volume de Águas residuárias tratado (1000 m³/ano): Volume anual de Águas residuárias coletado na área de atuação do prestador de serviços e que foi submetido a tratamento, medido ou estimado na(s) entrada(s) da(s) ETE(s) (CAESB, 2020).

Com o uso desses índices foi calculado o consumo médio de energia por metro cúbico de esgoto tratado e bombeado, para o ano de 2013, de acordo com as equações a seguir.

$$\text{Índice de consumo de energia (tratamento)} \left[\frac{kWh}{m^3} \right] = \frac{ES028}{ES006} \quad (\text{Equação 5-1})$$

$$\text{Índice de consumo de energia (elevatórias)} \left[\frac{kWh}{m^3} \right] = \frac{PA01b}{ES006} \quad (\text{Equação 5-2})$$

Os índices de consumo de energia referentes ao ano de 2013 calculados com as equações acima estão apresentados na Tabela 5-1 foram aplicados ao cálculo das emissões indiretas nos processos da base de dados.

Tabela 5-1 - Estimativa do consumo de energia elétrica nas ETE do DF em 2013 (CAESB, 2020).

	Tratamento de esgoto	Estações elevatórias
Índice de consumo de energia (kWh/m ³) - Geral para as ETE da CAESB	0,4898086	0,61528269

- Consumo de cal

Na ETEB Norte, para o condicionamento do efluente líquido da desidratação mecânica, é adicionada suspensão de hidróxido de cálcio hidratada (cal), que se combina com o fósforo existente no filtrado, formando fosfato de cálcio, assim se dá a eliminação do fósforo por precipitação (Batista, 2015). A quantidade de cal aplicada para precipitação de fósforo é calculada por estequiometria e na ausência de dados sobre o consumo desse insumo, a quantidade média de insumos químicos inorgânicos para o tratamento de 1m³ de esgoto na base de dados EcoInvent 3.6 foi utilizada: 7,7x10⁻⁷ kg por m³ de esgoto afluyente à ETE.

- Consumo de polieletrólito aniônico

Na ausência de dados sobre o consumo de polieletrólito aniônico nas câmaras de floculação, foi utilizada a quantidade média utilizada no processo da base de dados EcoInvent 3.6: 6,14x10⁻⁷ kg por m³ de esgoto afluyente ao tratamento.

- Consumo de sulfato de alumínio

Na ausência de dados sobre o consumo de sulfato de alumínio, a quantidade desse insumo no processo de tratamento de 1 m³ de esgoto da base de dados EcoInvent 3.6 foi utilizada: 0,0031512 kg por m³ de esgoto afluyente ao tratamento.

- Consumo de polímero catiônico

O consumo de polímero catiônico no processo de desidratação mecânica do lodo na ETEB Norte foi explicitado no trabalho de Batista (2015). Em 2013, o consumo de polieletrólito catiônico foi de 8,43 kg por m³ de lodo e esse valor foi então inserido no

processo de desaguamento lodos na base de dados para cálculo do fator de impacto dessa unidade.

5.2.5 Processos da base de dados similares à ETEBN

Sendo o tratamento de lodo tão complexo quanto o tratamento do esgoto e dada a importância das opções de gerenciamento e destinação final do lodo, o tratamento de esgotos é modelado com apenas um processo na base de dados e o tratamento de lodo foi modelado operação por operação. Dessa forma, também podem ser identificados os processos que causam mais impactos na ETL.

5.2.5.1 TRATAMENTO DE ESGOTO

Para o tratamento de esgoto, o processo escolhido reproduz o funcionamento de uma ETE com capacidade igual a 233.225 equivalente per capita, a ETEB Norte foi projetada para 250.000 habitantes e vazão de projeto igual a 29.013.120 m³/a. Como explicitado na documentação da base de dados, a sofisticação da infraestrutura de tratamento é proporcional à capacidade, portanto a ETEB Norte seria comparável a uma ETE Classe 1 da base de dados. A tabela a seguir traz algumas características das ETE disponíveis na base de dados e comparação com a ETEB Norte.

A ETE classe 1 da base de dados é equivalente à ETEB Brasília também pela quantidade de área construída. A ETE classe 1 possui tratamento preliminar por gradeamento e os tratamentos primário (decantador primário), secundário (lodos ativados, que realiza nitrificação e desnitrificação) e terciário (precipitação química do fósforo, floculação e flotação), conforme apresentado na Figura 5-14 (Doka, 2003b).

Tabela 5-2: Classes de ETE disponíveis na base de dados EcoInvent 3.6, comparação com a ETEB Norte

Classe	1 ¹	2 ¹	3 ¹	4 ¹	5 ¹	ETEBN (2013) ²
Pessoas atendidas	233.225	71.133	24.864	5.321	806	163.494
Volume tratado anual (m ³ /a)	47.114.22 7,0	14.369.78 0,0	5.022.94 2,0	1.074.82 7,0	162.83 7,0	15.105.744,0±255 4.799
% do solo impermeabilizada	75	57.6	52.6	50.5	50	51,77
Área total (m ²)	69.970	56.070	23.060	5.248	806.1	147.264

Tabela 5-2: Classes de ETE disponíveis na base de dados EcoInvent 3.6, comparação com a ETEB Norte

Classe	1 ¹	2 ¹	3 ¹	4 ¹	5 ¹	ETEBN (2013) ²
Área impermeabilizada (m ²)	52.480	32.270	12.130	2.650	403	76.240,951
Área vegetada (m ²)	17.490	23.790	10.930	2.599	403	71.023,049
Tempo de construção (a)	3	1.6	1.2	1.04	1	-
Vida Útil*	30	30	30	30	30	30

*Após a expiração da vida útil a ETE é expandida, renovada ou desativada. ² Batista, 2015; ¹Doka, 2003b

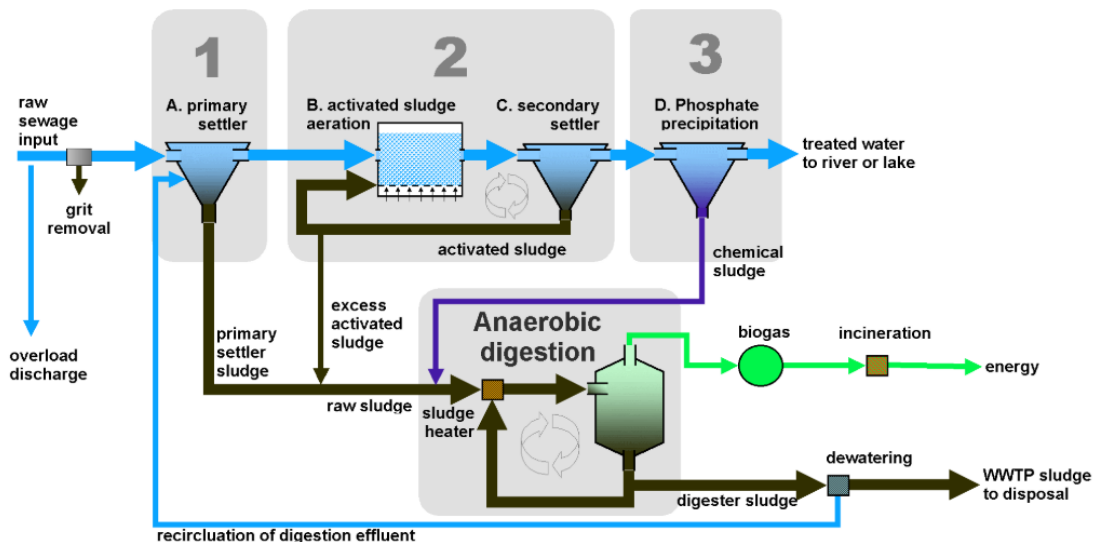


Figura 5-14: Representação esquemática dos processos e operações considerados no processo de tratamento de esgoto doméstico da base de dados EcoInvent 3.6 (Doka, 2003b)

Para prezar pela similitude, alguns ajustes foram feitos ao processo da base de dados. A incineração como disposição final do lodo foi anulada para o cenário 1, assim como a coleta de biogás, que não é informada no estudo de Batista (2015). O inventário desse processo foi ajustado para incluir as etapas de implantação (construção da infraestrutura da ETE, da rede de coleta de esgoto e mudança no uso do solo), operação (consumo de energia elétrica, transporte de lodo, consumo de insumos químicos, e disposição do material gradeado no aterro sanitário).

Os limites do sistema considerado na modelagem da ETE começam a partir da ligação das redes domésticas à rede da CAESB, passam pelo tratamento e se estendem até o lançamento do efluente tratado no Lago Paranoá. O efluente tratado possui cargas de poluentes, ainda que baixas. Esses poluentes são estabilizados nos corpos hídricos e esse impacto está fora das fronteiras do sistema. O inventário inclui emissões diretas a partir de perdas na rede de coleta durante a época de chuvas: 1% do material particulado e 2% do material dissolvido no esgoto é lançado diretamente no corpo hídrico e esse aspecto foi mantido (Doka, 2003b). Quanto ao consumo de insumos, o inventário quantifica o uso de sulfato de alumínio, cal, polímero aniônico, eletricidade, materiais de construção, construção da ETE e disposição final do material gradeado e do desarenador no aterro.

As características físico-químicas do esgoto importado para esse processo são baseadas na composição média dos lodos de esgoto na Suécia, a partir de um fator de conversão que considera 0,0813 kg de lodo por m³ de efluente (Doka, 2003b, 2003a). O fator de conversão para a ETEB Norte é igual a 0,208 kg de lodo por m³ de esgoto. Para o cálculo desse fator, foram utilizadas a sequência de equações a seguir.

$$Carga \left(\frac{kgSS}{d} \right) = \frac{Vazão \left(\frac{m^3}{d} \right) \times Concentração \left(\frac{g}{m^3} \right)}{1000 \left(\frac{g}{kg} \right)} \quad \text{Equação 5-3 (Von Sperling, 2014)}$$

Sendo que para a ETEB Norte em 2013 os valores médios são:

Vazão = 41.385,6 m³/d (Batista, 2015);

Concentração de SS = 208 g/m³(Batista, 2015).

$$Massa \ de \ lodo \left(\frac{kg}{d} \right) = \frac{Carga \ SS \left(\frac{kg \ SS}{d} \right)}{\frac{Sólidos \ Secos \ (\%)}{100}} \quad \text{Equação 5-4 (Von Sperling, 2014)}$$

Sendo que para a ETEB Norte:

Carga SS afluyente à ETE em 2013= 8608,2048 kgSS/d (Batista, 2015);

Teor de sólidos do lodo em 2013 = 2,17% (Batista, 2015).

$$Quantidade \ de \ lodo \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{Massa \ de \ lodo \left(\frac{kg}{d} \right)}{Vazão \ afluyente \left(\frac{m^3}{d} \right)} \quad \text{Equação 5-5}$$

Sendo:

Massa de lodo = 8.608,2048 kg/d;

Vazão afluyente à ETEB Norte = 41.385,6 m³/d

A Tabela 0-1 - Comparação entre os parâmetros do esgoto afluyente à ETEB Norte com os parâmetros do esgoto afluyente considerado no processo de tratamento da base de dados EcoInvent 3.6. explicita as características físico-químicas do esgoto afluyente à ETEB Norte e ao processo de tratamento de esgoto da base de dados, utilizado para cálculo do fator de emissão. Essa comparação é importante para aceitação dos resultados, pois as emissões diretas são estimadas por cálculos que levam em consideração as características físico-químicas (concentração de compostos) de 1m³ de esgoto (Doka, 2003a).

5.2.5.2 TRATAMENTO DE LODOS

➤ DIGESTÃO ANAERÓBIA

Trata-se de um processo de redução da matéria orgânica biodegradável no lodo, estabilização da matéria orgânica. O digestor anaeróbico teve seu equivalente similar na base de dados, um processo de digestão anaeróbia mesofílica (a 35°C), contendo tanque de digestão e coletor de gás. A vida útil dessa unidade é 30 anos, após esse tempo, ela deve ser expandida, reformada ou desativada. O inventário dessa unidade inclui a construção e os materiais de construção, além da operação, considera a entrada de lodos com 4% a 6% de Sólidos Totais, e assume uma degradação de 45% da matéria orgânica. Considera como subprodutos desse processo o biogás e o biossólido (Doka, 2003a). O consumo de energia, bem como a matriz energética desse processo foram adaptados para o contexto do DF.

➤ DESAGUAMENTO MECANIZADO

Esse processo importa o lodo úmido e tem como objetivos a redução do peso do lodo e redução da umidade para até 73% (exporta lodo desidratado), contabiliza a aplicação de polímeros orgânicos para otimizar a agregação das partículas, é compatível com o uso de centrífugas ou filtros-prensa (Doka, 2003a). Na ausência de um processo para modelagem do adensador por gravidade, um processo de desaguamento foi utilizado, sem contabilizar o consumo de polímeros no inventário.

➤ TRANSPORTE DO LODO À DESTINAÇÃO FINAL

O meio de transporte utilizado para estimativa de impactos na etapa de transporte à destinação final do lodo foi um caminhão-caçamba traçado com caçamba de dois eixos e capacidade pra 14m³ de carga.



Figura 5-15: Caçamba de transporte de lodo na ETEB Sul (Governo Do Distrito Federal, 2017)

O processo da base de dados escolhido como equivalente ao uso do caminhão caçamba traçado leva em consideração a construção e operação do veículo (consumo de diesel, manutenção, uso de vias, manutenção da caçamba) em seu inventário, e possui como unidade funcional o transporte de uma tonelada por um km.

➤ DESTINAÇÃO FINAL DO LODO

Em 2013 no DF 26% dos lodos eram destinados à secagem por solarização na ETE Samambaia, 35% para recuperação de áreas degradadas (expedição diretamente da ETE geradora para disposição no solo), 26% para armazenamento na ETE Planaltina e 13% restavam nas imediações das ETE geradoras (Batista, 2015). Na ausência de dados específicos para a ETEB Norte essas proporções gerais foram utilizadas nesse estudo.

Os fatores de emissão para estimativa das emissões relacionadas à disposição final do lodo em recuperação de áreas degradadas foram baseados no estudo de Boeira et al. (2009). Em estimativa de emissão de dióxido de carbono em solo tropical (latossolo vermelho distroférico argiloso) suplementado com lodo de esgoto em escala de bancada, os autores concluem que as emissões de C-CO₂ são proporcionais às doses de esgoto aplicadas ao solo e que não há redução na taxa de decomposição da MO para doses elevadas.

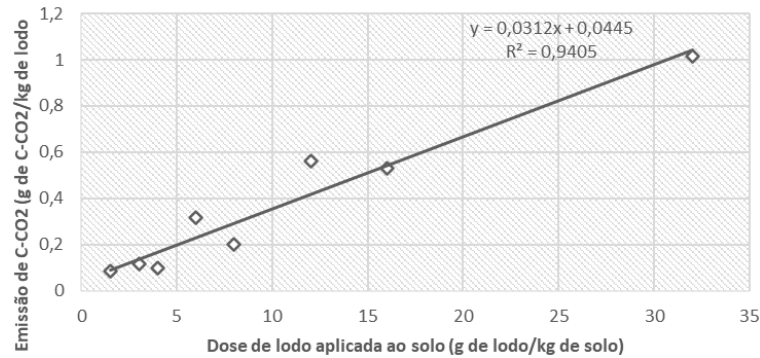


Figura 5-16 Fatores de emissão considerados para o cálculo das emissões de CO₂ relacionadas à destinação do lodo na recuperação de áreas degradadas. Adaptado de BOEIRA et al. (2009).

As medições de emissão foram realizadas em escala de bancada a partir da aplicação de diferentes doses de lodo de esgoto a testemunhas de solo. As doses foram calculadas levando em consideração o recomendado para um cultivo com adubação de 50 kg/ha, em comparação com a adubação convencional mineral (NPK) também aplicada às amostras de solo. A medição se deu por avaliação respirométrica para determinar a taxa de biodegradação da matéria orgânica nas amostras solo-esgoto e solo-fertilizante. Os autores concluíram que a amostra testemunha (solo) e a amostra com adubação mineral apresentaram comportamento semelhante, com emissão de 2% do carbono do solo. Já a perda de carbono dos sistemas lodo-solo variou entre 2,6 e 6,0% em 57 dias de incubação.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO INVENTÁRIO E CENÁRIOS ALTERNATIVOS

Para estimativa dos impactos na ETEBN em 2013 foi construído o cenário 1, e para auxílio na escolha de alternativas para redução dos impactos foram elaborados mais três cenários.

➤ Cenário 1: Vigente em 2013, com disposição final do lodo em áreas degradadas

A Figura a seguir é uma representação esquemática dos processos escolhidos na base de dados EcoInvent 3.6 para representar o tratamento de esgoto e o gerenciamento de lodos na ETEB Norte em 2013, o cenário 1. As setas com o símbolo I representam elementos importados aos limites do sistema e as setas com o símbolo E representam elementos

exportados do sistema. A espessura das setas é proporcional à magnitude do fluxo que simulam. A linha tracejada representa os limites do sistema objeto da ACV desse estudo.

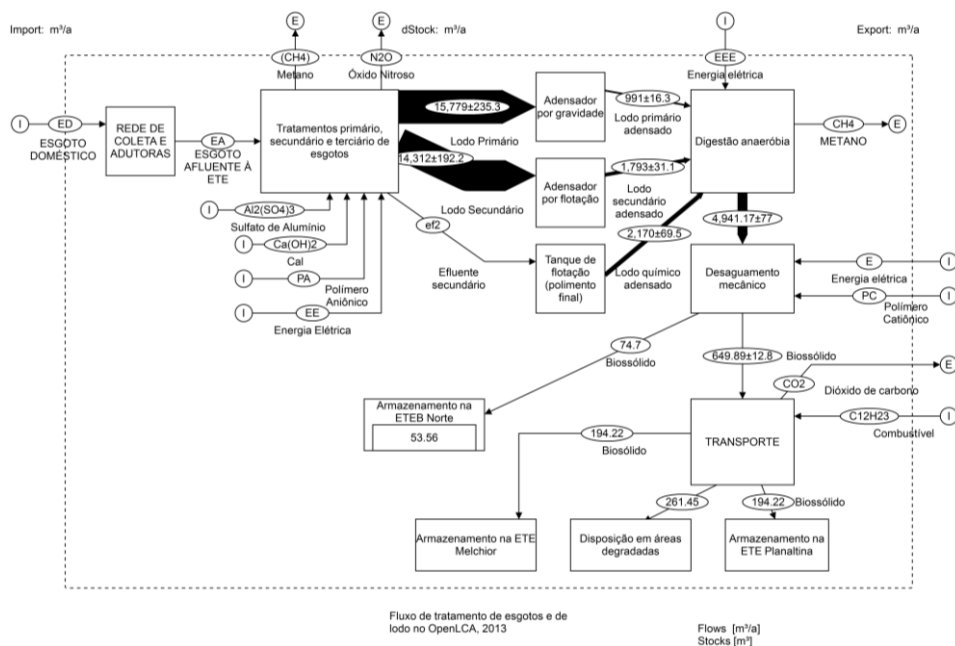


Figura 6-1: Fluxos de entradas e saídas na ETL e ETEBN em 2013. Elaboração no programa STAN 2.6.801.

➤ Cenário 2: Mesmo tipo de tratamento do esgoto, com incineração do lodo bruto

Esse cenário elimina a necessidade de operação do reator anaeróbico, frequentemente a unidade que mais emite CH_4 nas ETE, pois conta apenas com remoção da água do lodo. As considerações do inventário para cálculo do fator de emissão da unidade de incineração são:

- O lodo é transportado 10 km por caminhão até a unidade de incineração. Os estudos para implantação dessas unidades são complexos, por esse motivo essa distância da base de dados foi mantida e pode ser alterada uma vez que um inventário de CV com mais informações for elaborado;
- O lodo transportado possui 63% de seu conteúdo em água;
- O inventário do processo inclui construção e operação da unidade de incineração;
- A composição do lodo considerada no inventário é dada na Tabela 0-1;
- O inventário do processo de incineração acrescenta o transporte rodoviário do lodo da ETE a uma unidade de incineração a 10 km.
- O inventário inclui a disposição final do resíduo da incineração no aterro sanitário.

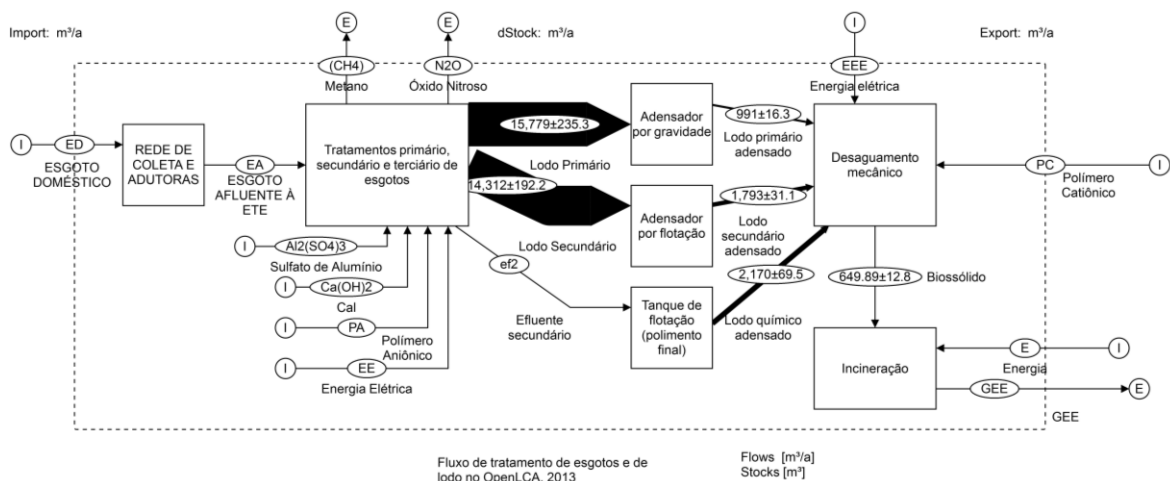


Figura 6-2: Cenário de tratamento do lodo desaguado em unidade de incineração

➤ Cenário 3: Mesmo tipo de tratamento para o esgoto e para o lodo, com incineração do lodo digerido

O processo de incineração do lodo de esgoto digerido apenas substitui a recuperação de áreas degradadas pela incineração como destinação final do lodo e faz as seguintes considerações:

- O lodo é transportado 10 km por caminhão até a unidade de incineração. Os estudos para implantação dessas unidades são complexos, por esse motivo essa distância da base de dados foi mantida e pode ser alterada uma vez que um inventário de CV com mais informações for elaborado.
- O lodo transportado possui 63% de seu conteúdo em água;
- O inventário do processo inclui construção e operação da unidade de incineração;
- A composição do lodo considerada no inventário é dada na Tabela 0-1;
- O inventário do processo de incineração acrescenta o transporte rodoviário do lodo da ETE a uma unidade de Incineração a 10 km.
- O inventário inclui a disposição final do resíduo da incineração no aterro sanitário.

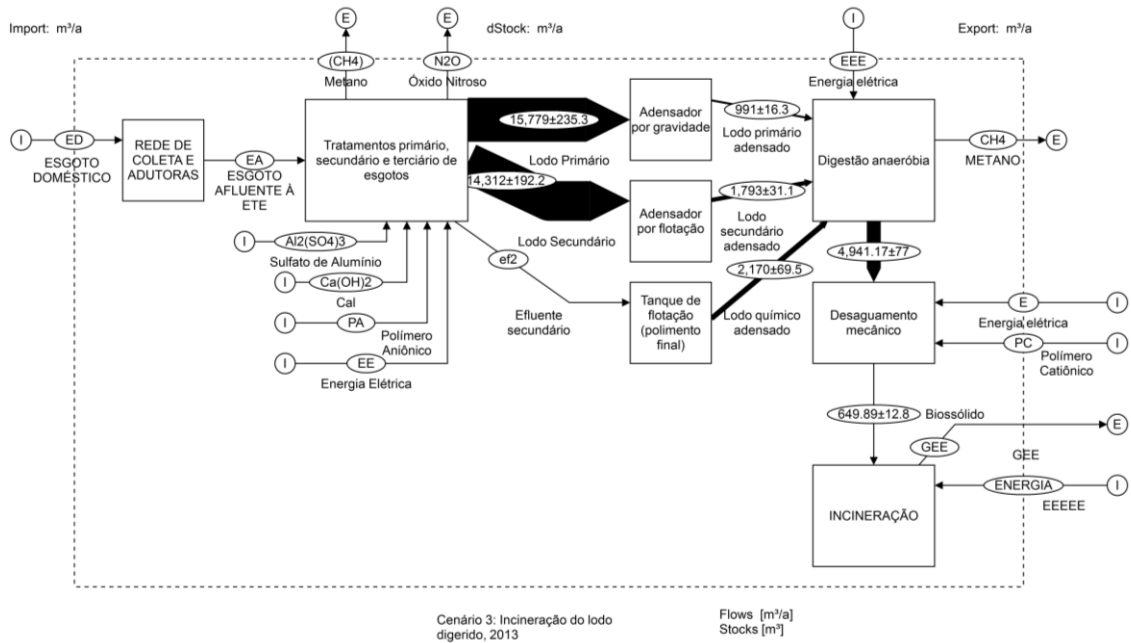


Figura 6-3: Cenário de tratamento do lodo em uma unidade de incineração

- Cenário 4: Mesmo tipo de tratamento do esgoto, com incineração do lodo em forno rotativo de cimento

Esse processo considera o coprocessamento do lodo bruto desidratado no forno rotativo de cimento, o inventário desse processo é apresentado na figura a seguir. O lodo é incinerado em coprocessamento durante o processo de fabricação de clínquer, um componente do cimento, responsável pela maior parte das emissões na produção de cimento (Jungbluth e Chudacoff, 2007). Na base de dados EcoInvent 3.6 há processos brasileiros com o inventário da produção de clínquer convencional e com coprocessamento. Esses processos foram utilizados para cálculo dos impactos dessa alternativa de destinação final do lodo e o fator de impacto do coprocessamento pôde ser comparado com o fator de impacto da fabricação de clínquer tradicional.

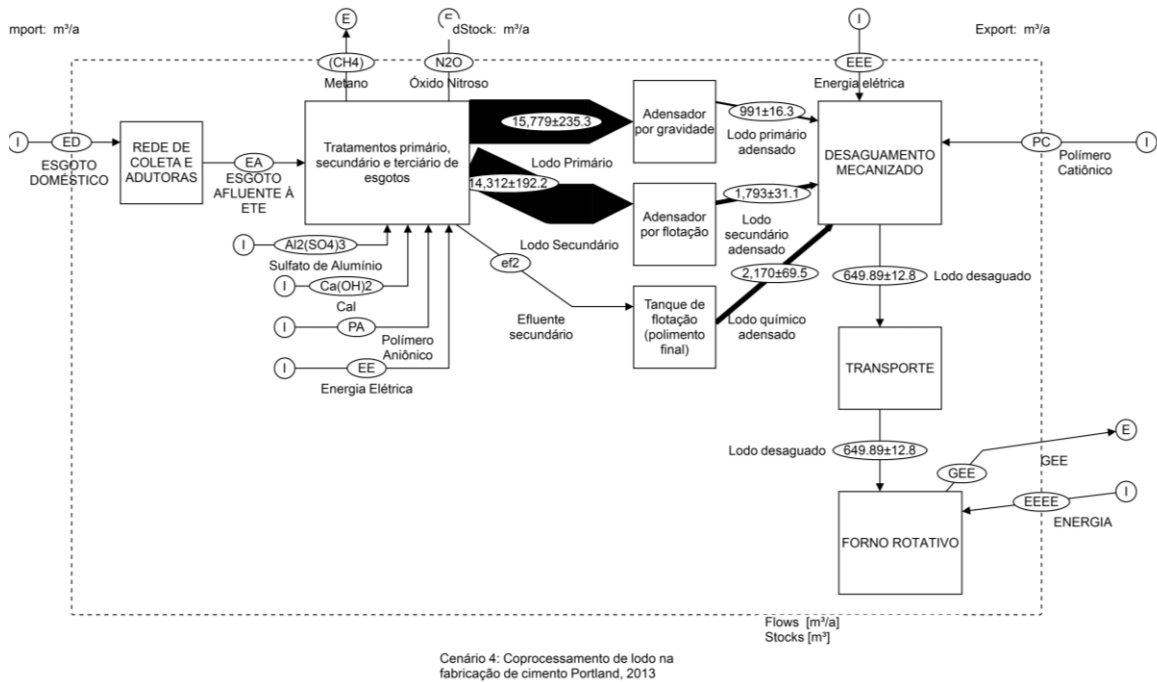


Figura 6-4: Cenário de coprocessamento do lodo na fabricação de clínquer

6.2 FATORES DE IMPACTO

Os fatores de impacto calculados no OpenLCA a partir dos processos da base de dados EcoInvent 3.6 são apresentados na Figura 6-5, para potencial de aquecimento global nos próximos 100 anos, com representação das incertezas (barra de desvio padrão). Na próxima sessão, para o cálculo dos impactos ambientais de operação da ETEBN, esses fatores serão multiplicados pelos fluxos de esgoto e lodo determinados no inventário de cada cenário, como mencionado na Equação 4-1. A unidade de maior fator de impacto para o aquecimento global é o digestor anaeróbico, com 4,8095 kg de dióxido de carbono equivalente emitidos a cada m³ de lodo processado. Quanto à disposição final do lodo, a opção executada pela CAESB em 2013 era a recuperação do solo em Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD). O fator de impacto para esse processo é pequeno em relação às outras opções de destinação final estudadas: 0,03312445 kg CO₂e por m³ de lodo aplicado ao solo. A opção de destinação final do lodo com maior fator de impacto para o aquecimento global é o coprocessamento do lodo nos fornos rotativos para a fabricação de clínquer, seguida pela incineração do lodo após os processos de gerenciamento de lodo já executados em 2013.

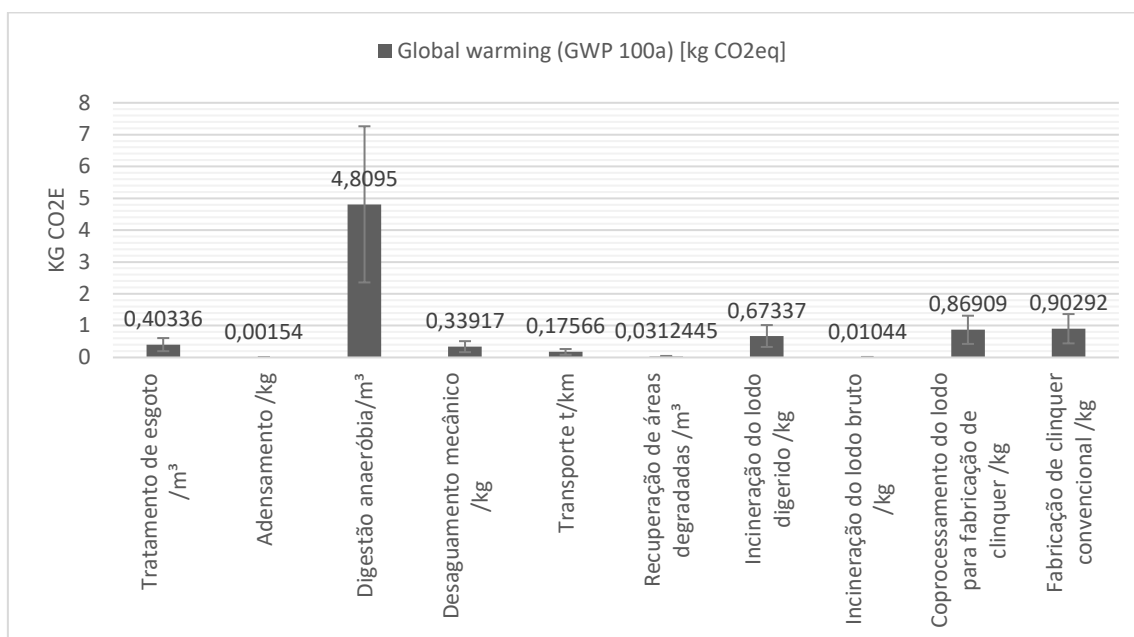


Figura 6-5-Fatores de impacto, potencial de contribuição para o aquecimento global em 100 anos

Para teste de análise de sensibilidade, outro método de agregação foi aplicado para o cálculo do fator de impacto para o tratamento de esgoto. Pelo método CML baseline, para o potencial de contribuição com o aquecimento global, esse fator é $0,40336 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3 \pm 0,23012$, conforme demonstrado na Figura 6-5. Utilizando o método IPCC GWP 100a, o fator de impacto é $0,40548 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3 \pm 0,23133$. Considerou-se que a diferença entre os fatores e os desvios calculados pelos dois métodos foi mínima, e os coeficientes calculados pelo método CML baseline foram aplicados ao cálculo dos impactos da ETEBN.

6.3 IMPACTOS DA ETEB NORTE: CONTRIBUIÇÃO PARA O AQUECIMENTO GLOBAL

Quanto à contribuição para o aquecimento global, a ETEBN foi responsável por 6.093.052,90 kg de CO₂e, 0,01% da contribuição de todo o setor de tratamento de resíduos no Brasil em 2013 (abaixo).

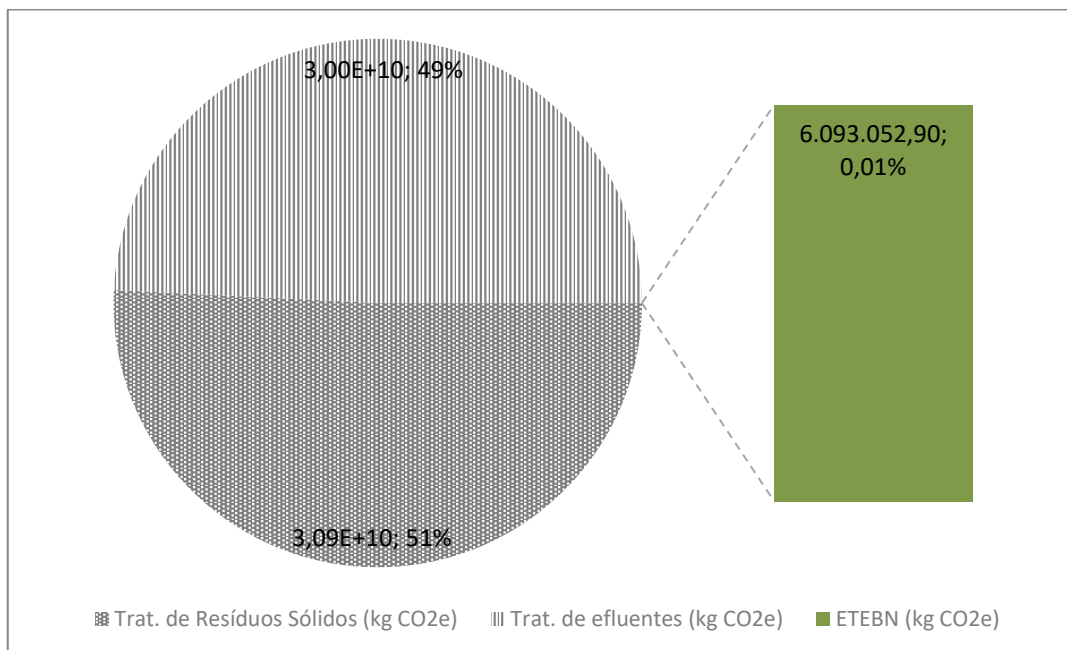


Figura 6-6: Emissões de GEE em CO₂e da ETEB no ano de 2013, comparação com as emissões nacionais para o setor de tratamento de resíduos nesse ano (MCTIC, 2020).

O serviço de coleta e tratamento de esgoto e lodo prestado pela ETEBN emitiu em 2013 37.267,74 kg CO₂e por pessoa atendida. Do total de emissões da ETEB Norte, o gerenciamento de lodos (tratamento e disposição final) foi responsável por 25.730,80±2.928,07kg CO₂e, como demonstrado na Figura a seguir, sendo a digestão anaeróbia o processo mais significativo para esse impacto. As emissões do gerenciamento de lodo representam uma pequena parcela do total emitido na ETEBN, isso se deve em parte à diferença entre o volume de esgoto tratado e o volume de lodo tratado, visto que em 2013 a ETEBN tratou 15.105.744,0±2554.799 m³ de esgoto e a ETL tratou 22.261±497 m³ de lodo.

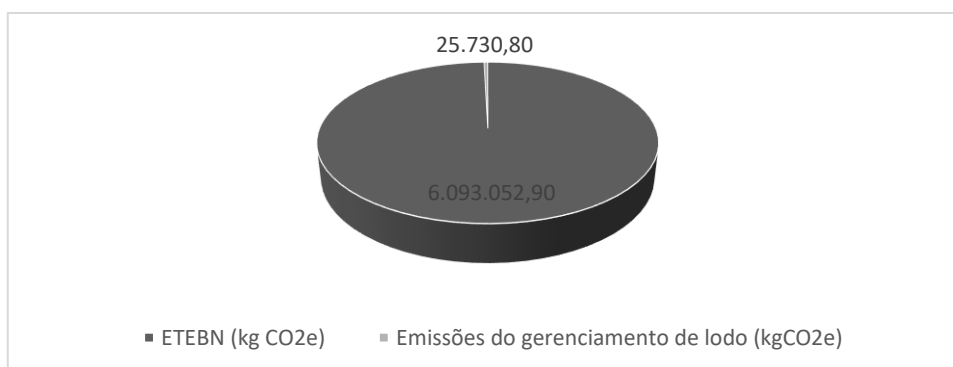


Figura 6-7: Parcela do gerenciamento de lodo nas emissões da ETEBN em kg de CO₂e em 2013

A incerteza para o cálculo das emissões de GEE na ETL, calculada de acordo com a equação 4-2, é 2.928,07. A maior parte desse valor se deve ao grau de incerteza no volume anual tratado na ETEBN. Para um volume afluyente igual a 15.105.744,0 m³/ano o desvio padrão das médias mensais é 2554,79903, enquanto a incerteza para o fator de emissão é 0,23011688 (Figura 5-16). Para os impactos dos outros processos, as incertezas variam muito entre si. Para o adensamento, que apresenta fator de impacto igual a 0,00154 kg CO₂e/m³, a incerteza associada ao fator de impacto é 0,000878, mas a multiplicação entre a incerteza do fator de impacto e a incerteza do fluxo de lodo é um valor gigantesco (Figura 6-8). Devido à natureza matemática da Equação 3-2, quanto menor o fator de impacto, maior a incerteza associada ao mesmo.

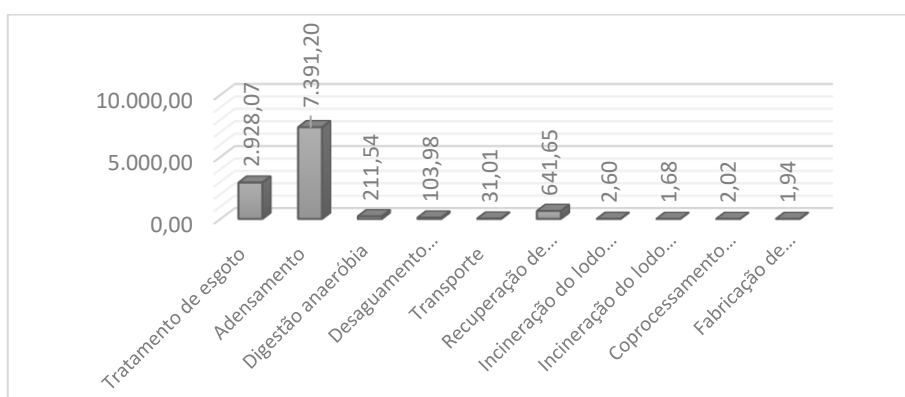


Figura 6-8: Incerteza para as emissões de GEE dos processos

A Figura a seguir demonstra as emissões de GEE do gerenciamento de lodo no cenário 1, etapa por etapa. Como o esperado, as emissões do reator anaeróbio são significativas para o gerenciamento de lodos, devido às emissões diretas de metano que ocorrem durante a degradação anaeróbia da matéria orgânica. O segundo processo mais significativo para as emissões de GEE no cenário 1 é o desaguamento mecanizado. A maior parte das emissões do desaguamento mecanizado são indiretas, devidas ao ciclo de vida dos insumos químicos consumidos (polímero catiônico).

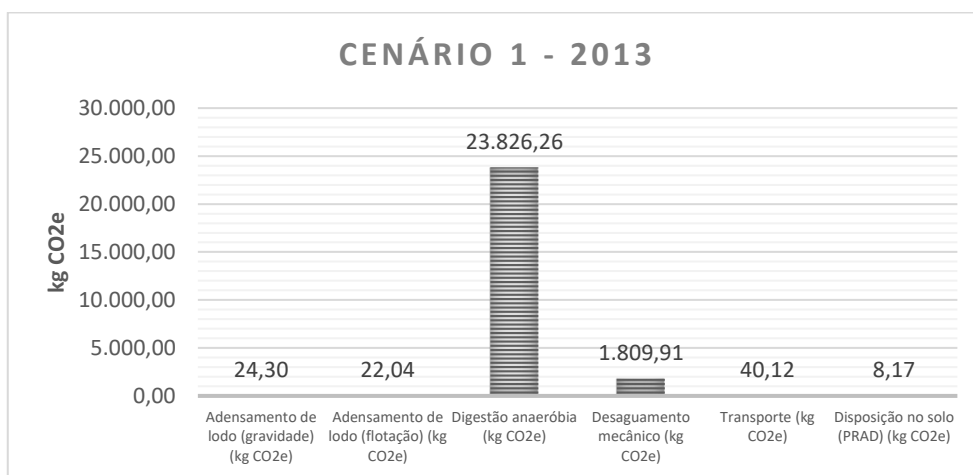


Figura 6-9: Potencial de contribuição do gerenciamento de lodo na ETBN em 2013 (Cenário 1) para o aquecimento global em 100 anos

Quanto às alternativas de disposição final do lodo, a incineração do lodo bruto é o cenário de maior perspectiva de redução das emissões de GEE, seguida pelo coprocessamento do lodo nos fornos de fabricação do cimento. A incineração do lodo após o seu tratamento convencional (cenário 3) representaria o aumento das emissões em 389,33 kg CO₂e, em relação ao cenário de 2013. A comparação entre os cenários de destinação do lodo pode ser observada na figura abaixo.

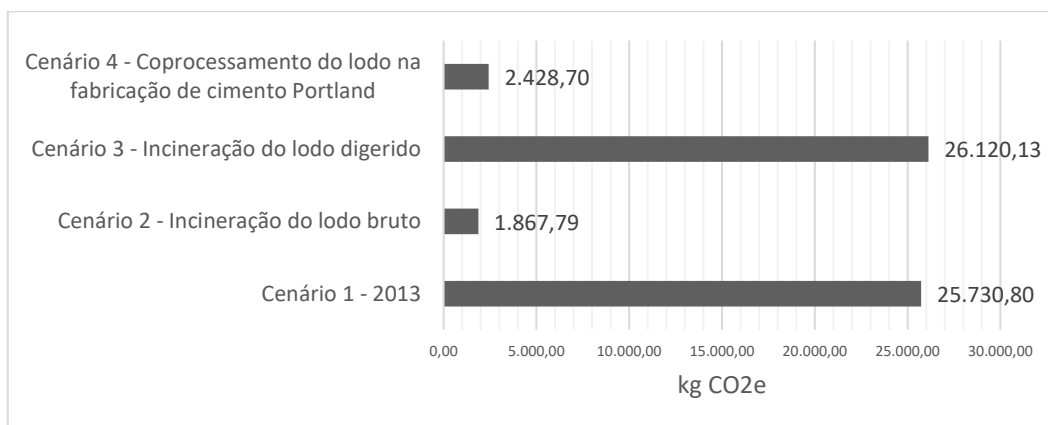


Figura 6-10: Comparação entre os cenários em relação às emissões de GEE

A incineração do lodo bruto (cenário 2), concentra a maior parte de suas emissões na etapa de desaguamento mecânico. Curiosamente, a incineração do lodo bruto corresponde à menor parcela das emissões, em sua maioria diretas.

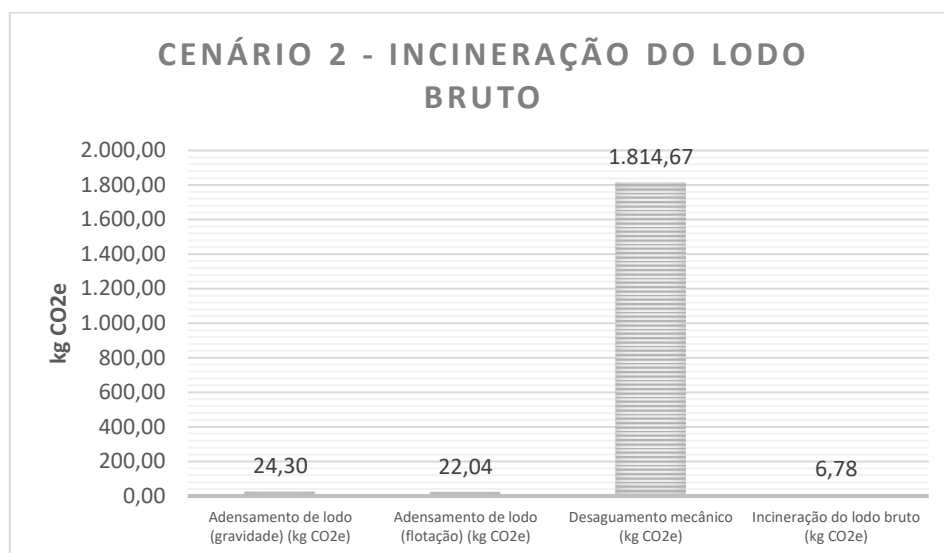


Figura 6-11: Potencial de contribuição para o aquecimento global em 100 anos do cenário

2

No cenário 3 o lodo continuaria sendo tratado nos mesmos processos do cenário 1 e teria sua disposição final em uma unidade de incineração. Portanto, as emissões do adensamento e da digestão anaeróbia e do desaguamento mecânico se repetem e as emissões da destinação final na unidade de incineração são acrescentadas.

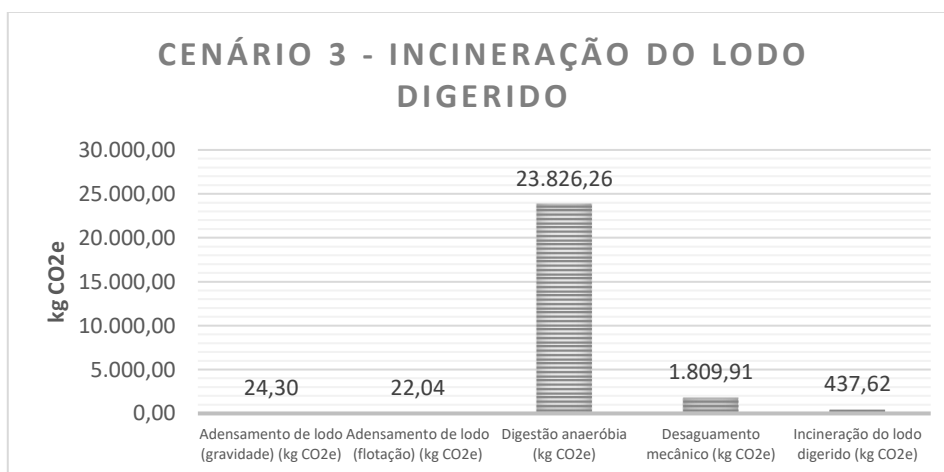


Figura 6-12: Potencial de contribuição para o aquecimento global em 100 anos do cenário

3

Para o cenário 4 o coprocessamento do lodo na fabricação de clínquer, representa 23,25% das emissões de GEE de todo o gerenciamento. Para as emissões de GEE, o fator de emissões do coprocessamento é menor que o fator de emissões para fabricação tradicional do clínquer (rever a Figura 6-5), mas para melhor entendimento das compensações ambientais que esse cenário poderia fornecer, é necessário um estudo comparativo completo

entre a fabricação de clínquer tradicional e a fabricação de clínquer com coprocessamento de lodo.

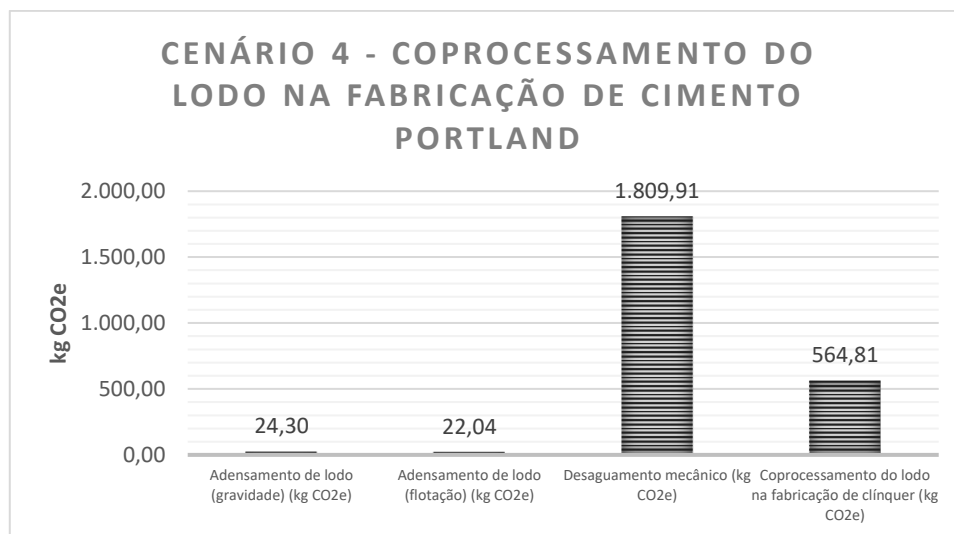


Figura 6-13: Potencial de contribuição para o aquecimento global em 100 anos do cenário

4

Considerando os resultados da ACV apresentados, as melhores opções de destinação final para o lodo de esgoto seriam a incineração do lodo sem digestão anaeróbica em uma unidade de incineração, além do coprocessamento do lodo no forno de fabricação de clínquer. As emissões do gerenciamento do lodo não representaram a maior parte das emissões da ETEBN porquê outras etapas do inventário foram mais significativas para o fator de impacto, como o consumo de energia elétrica, insumos químicos e a construção da infraestrutura.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esse trabalho cumpriu com o objetivo de análise de ciclo de vida da ETE Brasília Norte a partir da realização das etapas de planejamento, construção de inventário de ciclo de vida para a operação em 2013, avaliação de impactos, análise de sensibilidade, construção de cenários alternativos e seleção da melhor alternativa de destinação final do lodo. Foi apresentada a parcela das emissões nacionais em tratamento de resíduos devida à operação da ETEBN em 2013: 0,01%. As emissões por pessoa atendida foram também apresentadas: 37.267,74 kg CO₂e per capita. A critério de comparação, Arrais et al. (2020) estimaram que a média de emissões em mobilidade no DF foi de 1.326 kg CO₂-eq por habitante em 2016. Quanto à ETL, de acordo com a bibliografia especializada, a expectativa seria de que a linha

de tratamento de lodo fosse responsável por grande parte dos impactos da ETE, mas o que se observou foi que, quando os limites do sistema em análise se estendem desde a coleta até a última etapa do tratamento na ETE, os impactos relacionados ao consumo de energia nas elevatórias e no tratamento se sobressaem. Esses resultados ressaltam a importância do cálculo das emissões indiretas.

Para continuação da pesquisa sobre esse assunto, é necessária a construção de um inventário mais atualizado da ETEBN, a partir de um minucioso levantamento operacional das entradas e saídas dentro dos limites do sistema. A ACV é uma técnica iterativa, e o inventário de ciclo de vida da ETEBN pode ser atualizado e complementado para que os impactos levantados não sejam subestimados. Um dado importante para o inventário é o consumo de energia elétrica de cada etapa do tratamento da fase líquida e da fase sólida, além do consumo de todos os insumos químicos, para a identificação de etapas críticas do tratamento em termos de emissões.

A construção de cenários alternativos é um teste de viabilidade ambiental promissor para novos empreendimentos, para identificação de oportunidades de redução dos impactos. Por exemplo, a avaliação de cenários com reaproveitamento energético do biogás para a operação da própria ETE. Podem ser avaliadas as emissões evitadas, ou compensação ambiental, com a incineração do lodo nos fornos rotativos de fabricação de clínquer, a disposição do lodo no solo (economia de fertilizantes minerais), ou o reaproveitamento de energia nas unidades de incineração. Além dos efeitos do impacto do crescimento urbano na bacia de esgotamento da ETEBN, seria interessante que cenários futuros contassem com as perspectivas de crescimento ou diminuição da demanda para tratamento na ETEBN.

Tendo em vista o déficit nacional na prestação dos serviços de saneamento, é importante que o inventário nacional de emissões especifique as emissões diretas decorrentes do lançamento de esgoto sem tratamento nos corpos hídricos. Ainda, considerando a importância da etapa de construção para os impactos ambientais do setor, e a perspectiva de ampliação dos serviços de coleta e tratamento de esgoto, o estudo de alternativas de redução de impactos se faz pertinente.

A partir dos dados levantados, conclui-se que a análise, através do método Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), dos impactos ambientais decorrentes do tratamento de esgoto e de lodos em estações de tratamento de esgoto é uma promissora ferramenta de fomento à tomada de decisão. Recomenda-se, ainda, a continuidade na construção do inventário de

ciclo de vida da ETEBN, das opções de destinação final do lodo, assim como das outras ETE do DF.

7 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ABNT. (2004). *ABNT NBR ISO 14041 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Definição de objetivo e escopo e análise de inventário*. 25.

Acero, A. P., Rodriguez, C., & Cirotto, A. (2017). LCIA methods: Impact assessment methods in life cycle assessment and their impact categories. Version 1.5.6. *Green Delta*, (23), 1–23.

ADASA. (2016). RELATÓRIO DE FISCALIZAÇÃO. Disponível em: <http://www.adasa.df.gov.br/> website: http://www.adasa.df.gov.br/images/storage/area_de_atuacao/abastecimento_agua_esgotamento_sanitario/fiscalizacao/relatorios_vistoria_fiscalizacao_rvf/esgoto_2017/RV F-006-SAE-2016-Fiscalizacao-ETE-Norte-Extravasamento-Lodo.pdf

Arrais, C. de S., Silva, V. A., & Pineda, F. J. C. (2020). ESTIMATIVA DA CONTRIBUIÇÃO DA MOBILIDADE URBANA PARA O AQUECIMENTO GLOBAL NO DISTRITO FEDERAL EM 2016. *XX Semana Universitária Da UnB*.

Associação, A. (2001). *NBR ISO 14040 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura*. 1–10.

Batista, L. F. (2015). Lodos Gerados Nas Estações De Tratamento De Esgotos No Distrito Federal: Um Estudo De Sua Aptidão Para O Condicionamento, Utilização E Disposição Final. Disponível em: http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/18139/1/2015_LucileneFerreiraBatista.pdf

Baumann, H., & Tillman, A. (2004). *The hitchhiker's guide to LCA*.

BOEIRA, R. C., LIGO, M. A. ., & MAXIMILIANO, V. C. . (2009). *Emissão de C-CO 2 em solo tropical suplementado com lodo de esgoto*. 3–6. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/577327/emissao-de-c-co2-em-solo-tropical-suplementado-com-lodo-de-esgoto>

Bonamente, M. (2017). *Statistics and Analysis of Scientific Data*.

(CAESB), C. de S. do D. F. (2018). *Relatório da administração*. 66. Disponível em: https://www.caesb.df.gov.br/images/arquivos_pdf/RelatoriodaAdministracao-2018.pdf

CAESB. (2020). *RELATÓRIO DE INDICADORES DE DESEMPENHO*.

- Chernicharo, C. A. de L. (2007). *Reatores Anaeróbios*. (2ª edição). Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG.
- MINC (2014). *Plano Nacional de Saneamento Básico*. 220. Disponível em: http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/PlanSaB/plansab_texto_editado_para_download.pdf
- Dao, H., Peduzzi, P., & Friot, D. (2018). National environmental limits and footprints based on the Planetary Boundaries framework: The case of Switzerland. *Global Environmental Change*, 52(May), 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.06.005>
- Davis, M. (2016). *Tratamento de Águas para Abastecimento e Residuárias*. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595155633/>.
- Doka, G. (2003a). Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. *Ecoinvent Report No. 13*, 0(13), 101. Disponível em: http://www.doka.ch/13_I_WasteTreatmentGeneral.pdf
- Doka, G. (2003b). Part IV: Wastewater Treatment. *Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Ecoinvent Report No. 13, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, December 2003*, (13), 54.
- Foley, J., Haas, D. De, Hartley, K., & Lant, P. (2010). Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems. *Water Research*, 44(5), 1654–1666. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.11.031>
- Friedrich, E. (2002). Life-cycle assessment as an environmental management tool in the production of potable water. *Water Science and Technology*, 46(9), 29–36. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0198>
- Girod, B., & de Haan, P. (2010). More or better? A model for changes in household greenhouse gas emissions due to higher income. *Journal of Industrial Ecology*, 14(1), 31–49. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00202.x>
- Governo Do Distrito Federal. (2017). *Plano Distrital de Saneamento Básico - Diagnóstico Situacional - Esgotamento Sanitário*. 2. Disponível em: <http://www.adasa.df.gov.br/plano-distrital-de-saneamento-basico-e-de-gestao-integrada-de-residuos-solidos>
- Governo Do Distrito Federal. (2018). *PDGIRS – Plano Distrital De Gestão Integrada De Resíduos Sólidos*. 3, 797. Disponível em: <http://www.sinesp.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/03/PDGIRS.pdf>

- GreenDelta. (2020). Open LCA. Disponível em: <http://www.openlca.org/>
- Hong, J., Hong, J., Otaki, M., & Jolliet, O. (2009). Environmental and economic life cycle assessment for sewage sludge treatment processes in Japan. *Waste Management*, 29(2), 696–703. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.03.026>
- Infraestrutura de Dados Espaciais IDE-DF. (2020). Geoportal. Retrieved September 21, 2020, from <https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/mapa/#>
- IPCC. (2006). Chapter 6 Wastewater Treatment and. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 5 Waste*, 5, 1–56. Disponível em: www.ipcc-nggip.iges.or
- Joseph, T., Baah, K., Jahanfar, A., & Dubey, B. (2015). A comparative life cycle assessment of conventional hand dryer and roll paper towel as hand drying methods. *Science of the Total Environment*, 515–516, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.112>
- Jungbluth, N., & Chudacoff, M. (2007). Life cycle inventories of bioenergy. *Final Report Ecoinvent ...*, (17), pp143-157. Disponível em: http://www.researchgate.net/publication/230725648_Life_Cycle_Inventories_of_Bioenergy._ecoinvent_report_No._17/file/9c96051b76e2fb8dce.pdf
- Laurent, A., Bakas, I., Clavreul, J., Bernstad, A., Niero, M., Gentil, E., ... Christensen, T. H. (2014). Review of LCA studies of solid waste management systems – Part I: Lessons learned and perspectives. *Waste Management*, 34(3), 573–588. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.045>
- Lundin, M., Bengtsson, M., & Molander, S. (2000). Life cycle assessment of wastewater systems: Influence of system boundaries and scale on calculated environmental loads. *Environmental Science and Technology*, 34(1), 180–186. <https://doi.org/10.1021/es990003f>
- Lyons, E., Zhang, P., Benn, T., Sharif, F., Li, K., Crittenden, J., ... Chen, Y. S. (2009). Life cycle assessment of three water supply systems: Importation, reclamation and desalination. *Water Science and Technology: Water Supply*, 9(4), 439–448. <https://doi.org/10.2166/ws.2009.534>
- McNamara, G., Fitzsimons, L., Horrigan, M., Phelan, T., Delaure, Y., Corcoran, B., ... Clifford, E. (2016). Life cycle assessment of wastewater treatment plants in Ireland. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 4(3), 216–233. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.2016.04.0018>
- MCTIC. (2020). Emissões em dióxido de carbono equivalente por setor. Retrieved

- December 3, 2020, from SISTEMA DE REGISTRO NACIONAL DE EMISSÕES website:
https://sirene.mctic.gov.br/portal/opencms/paineis/2018/08/24/Emissoes_em_dioxido_de_carbono_equivalente_por_setor.html
- Moura, A. M. M. de. (2013). Aplicação Dos Instrumentos De Política Ambiental No Brasil: Avanços E Desafios. *Governança Ambiental No Brasil: Instituições, Atores e Políticas Públicas*, 111–145.
- Niero, M., Pizzol, M., Gundorph, H., & Thomsen, M. (2014). Comparative life cycle assessment of wastewater treatment in Denmark including sensitivity and uncertainty analysis. *Journal of Cleaner Production*, 68, 25–35.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.051>
- Pacheco Jordão, E., & Arruda Pessoa, C. (2005). *Tratamento de Esgotos Domésticos* (4ª edição).
- Parravicini, V., Svoldal, K., & Krampe, J. (2016). Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants. *Energy Procedia*, 97, 246–253.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.067>
- Raghuvanshi, S., Bhakar, V., Sowmya, C., & Sangwan, K. S. (2017). Waste Water Treatment Plant Life Cycle Assessment: Treatment Process to Reuse of Water. *Procedia CIRP*, 61, 761–766. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.170>
- Righi, S., Oliviero, L., Pedrini, M., Buscaroli, A., & Della, C. (2016). Life Cycle Assessment of management systems for sewage sludge and food waste: centralized and decentralized approaches. *Journal of Cleaner Production*, 44(2013), 8–17.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.004>
- Righi, S., Oliviero, L., Pedrini, M., Buscaroli, A., & Della Casa, C. (2013). Life Cycle Assessment of management systems for sewage sludge and food waste: Centralized and decentralized approaches. *Journal of Cleaner Production*, 44(2013), 8–17.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.004>
- SNIS. (2018). Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto. In *SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO*. Disponível em:
http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2018/Diagnostico_AE2018.pdf
- Sperling, M. Von. (2014). *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos* (4ª edição; Editora UFMG, Ed.). Belo Horizonte.
- Standard, I. (1998). *Iso 14041. 1998*.

- Von Sperling, M. (2016). *Princípios básicos do tratamento de esgoto* (1ª edição).
- Wang, X. H., Wang, X., Huppel, G., Heijungs, R., & Ren, N. Q. (2015). Environmental implications of increasingly stringent sewage discharge standards in municipal wastewater treatment plants: Case study of a cool area of China. *Journal of Cleaner Production*, 94, 278–283. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.007>
- Weidema, B., Hischer, R., Althaus, H., & Bauer, C. (2009). Code of Practice.ecoinvent report No. 2. *Swiss Centre for Life Cycle Inventories*, 1(2), 32.

ANEXO

Tabela 0-1 - Comparação entre os parâmetros do esgoto afluente à ETEB Norte com os parâmetros do esgoto afluente considerado no processo de tratamento da base de dados EcoInvent 3.6.

Parâmetros do Águas residuárias (kg/m ³)	Processo EcoInvent 3.6 - Treatment of wastewater, <u>capacity 4.7E10 l/year</u> wastewater, average ²					Processo real
	Afluente	Efluente	Coefficiente de transferência para o lodo	Coefficiente de transferência para o efluente tratado	Coefficiente de transferência para o ar como CO ₂	Tratamento de Águas residuárias <u>Capacidade 1,51E10 l/ano¹</u>
DQO	0,1556	0,02797	21,0%	18%	21,0%	0,496±0,1
DBO	0,1036	0,00829	69,7%	8%	22,3%	0,310±0,075
COD	0,04575	0,00652	61,0%	14,2%	36,0%	-
COT	0,0673	0,00652	65,8%	9,7%	24,5%	0,0684944
Sulfato	0,044	0,044	0,0%	100%	0	-
S particulado	0,002	0	100%	0	0	-
S total	-	0,044	4,3%	95,7%	0	0,0005408
Amônia(NH ₄ -N)	0,01495	0,00875	15,4%		6%	0,0052832
Nitrato (NO ₃ -N)	0,00105	0,01112	1,9%		11,9%	0,00069888
Nitrito (NO ₂ -N)	0,0004	0,0002	0,9%		6,0%	0,00069888
N particulado	0,03279	0,5	100%			-
N orgânico solúvel	0,008392	0	11,4%		6,0%	-
N Kjeldahl Total	-		22,3%		5,2%	0,0092976
Fosfato	0,002459	0,001273	48,2%	51,8%	0%	-
P particulado	0,0006147	0	100%	0%	0%	-
P total	-	0,001273	58,6%	41,4%	0%	0,0065±0,00134
Cloro	0,03003		0%	100%		-
Flúor	0,00003277		0%	100%		-
Arsênio	0,0000009		22%	78%		-
Cádmio	0,0000002806		50%	50%		0,00078624
Cobalto	0,000001618		50%	50%		-
Cromo	0,00001223		50%	50%		0,00699088
Cobre	0,00003744		75%	25%		0,0515632
Mercúrio	0,0000002		70%	30%		0,00170144
Manganês	0,000053		50%	50%		-

Molibdênio	0,000000 9574		50%	50%		-
Níquel	0,000006 589		40%	60%		0,00437008
Chumbo	0,000008 631		90%	10%		0,00611728
Estanho	0,000003 4		50%	50%		-
Zinco	0,000109 4		70%	30%		0,158184
Silício	0,03126		5%	95%		
Ferro	0,007093		50%	50%		0,0053248
Calcio	0,05083		10%	90%		0,0042016
Alumínio	0,001038		95%	5%		0,008424
Potássio	0,000398 9		50%	50%		0,0007904
Magnésio	0,005707		10%	90%		0,0029328
Sódio	0,002186		50%	50%		0,0011856

¹:(Batista, 2015), ²: (Doka, 2003a)