

REVISÃO DE METODOLOGIA DE ESTIMATIVA DE GEE ORIUNDOS DO TRATAMENTO DE ESGOTO SOB ÓTICA DE EMPRESAS DE SANEAMENTO

Bruno Garcia Silva ⁽¹⁾

Doutor em hidráulica e saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP) e especialista de processos de esgoto na Iguá Saneamento.

Thaís Carolina Ferreira Waiss ⁽²⁾

Mestre em Ciências pelo Programa de Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE/USP). Especialista em Saneamento Ambiental pela Universidade Estadual do Norte do Paraná (UENP). Engenheira Ambiental pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). Engenheira da Gerência de Planejamento e Desenvolvimento Ambiental (GPDA) da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

Cassius Nonato de Souza Freire ⁽³⁾

Bacharel em Biologia pela Universidade Federal de Lavras / MG (UFLA). Analista Ambiental da COPASA MG, e membro do Comitê Clima - comitê gestor institucional sobre mudanças e variabilidades climáticas.

Amanda Maia Pereira ⁽⁴⁾

Mestranda em Saneamento Ambiental pelo Programa de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PEA/UFRJ). Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Engenheira da Diretoria de Novos Negócios da GS Inima Brasil.

Felipe Chelles Lobo ⁽⁵⁾

Engenheiro Ambiental e Urbano pela Universidade Federal do ABC (UFABC) e sênior da Diretoria de Relações Institucionais e Sustentabilidade na GS Inima Brasil, especializado em práticas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

Endereço ⁽¹⁾: Rua Francisco Gigliotti – Vila São João - São José do Rio Preto – São Paulo - CEP: 15091-280 - Brasil - Tel: +55 (19) 99805-5247 - e-mail: b.garciasilva@gmail.com.

RESUMO

Durante o processo de tratamento de efluentes e após seu lançamento no corpo receptor, gases do efeito estufa (GEEs) como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) são liberados para a atmosfera. O dióxido de carbono produzido durante a respiração dos microrganismos é desconsiderado em inventários de emissões por ser de origem biogênica e inerentes ao processo. A principal emissão de GEE com potencial de impacto se deve ao metano e ao óxido nitroso. O metano é gerado principalmente pela degradação da matéria orgânica em processos anaeróbios de tratamento de efluentes ou pela digestão anaeróbia do lodo gerado. O principal fator para determinar o potencial de geração de metano no tratamento de efluentes é a quantidade de matéria orgânica degradável removida no tratamento, ou a quantidade de sólidos voláteis reduzidos durante o tratamento do lodo. Quanto ao óxido nitroso, este gás é produzido durante o processo de oxidação do nitrogênio amoniacal e orgânico em processos aeróbios e durante a redução de nitrito e nitrato em processos anóxicos, ocorrendo, inclusive, de forma indireta quando o efluente é lançado no corpo hídrico. Atualmente, há uma falta de padronização das premissas de cálculo e de coeficientes por parte de empresas de saneamento na metodologia para estimativa de GEE oriundos do tratamento de esgoto. Isso ocorre, pois o método disponibilizado pelo IPCC (2019) e pelo GHG Protocol Brasil (2020) visa o cálculo nacional e não está adaptado para a abordagem *bottom-up*. Diante disto, cada empresa de saneamento realiza adaptações de acordo com sua realidade operacional, e assume premissas distintas para a elaboração de seus inventários. Outro ponto de atenção refere-se a algumas simplificações adotadas nas metodologias, oriundas da simplificação dos dados de entrada, que podem resultar em tomadas de decisão equivocadas quanto a escolha de rotas tecnológicas de tratamento visando a redução de GEE. Simplificações estas que muitas vezes consistem na não-contabilização de emissões de gases dos processos na ETE que não se refere diretamente com o tratamento da fase líquida, como, por exemplo, as emissões de metano geradas do tratamento de lodo em lagoas de decantação. Considerando isso, este trabalho revisou a metodologia de cálculo, para que seja de viável aplicação e para que os resultados forneçam bases sólidas para fortalecer o setor de saneamento como parte da solução para a jornada de descarbonização.

PALAVRAS-CHAVE: Gases do Efeito Estufa, Mudanças Climáticas, Tratamento de Efluentes, Inventários de Gases do Efeito Estufa, Metodologia de Cálculo.

INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas tem impulsionado a busca por soluções para mitigar as emissões de gases do efeito estufa (GEEs) provenientes de diversas atividades humanas. Nesse contexto, as estações de tratamento de esgoto (ETEs) têm sido objeto de interesse, uma vez que emitem significativas quantidades de GEEs durante o processo de tratamento. Esses gases incluem principalmente o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). O dióxido de carbono produzido durante a respiração dos microrganismos é desconsiderado em inventários de emissões por ser de origem biogênica e inerentes ao processo. Por sua vez, o CO_2 emitido a partir da queima do metano nas ETEs é contabilizado pela ferramenta de cálculo do Programa Brasileiro GHG, mas, nesse caso, considerado como de origem biogênica.

Os processos tratamento de esgoto representam a principal parcela de emissões dos inventários de empresas de saneamento (MENDONÇA, 2021). A grande variedade de processos de tratamento de esgoto dificulta o processo de estimativa das emissões. Uma empresa de saneamento pode operar centenas de diferentes plantas de tratamento. Cada planta pode conter um ou mais processos de tratamento com potencial de geração de gases, e cada um desses processos possui características únicas quanto a possibilidade de geração de GEE. Sistemas aeróbios, por exemplo, possuem maior potencial de emissões de óxido nitroso, enquanto sistema anaeróbios possuem maior potencial de geração de metano. Mesmo dentre os sistemas anaeróbios existem aqueles que são mais eficientes na recuperação do metano, como, por exemplo, reatores anaeróbios do tipo UASB quando comparados com lagoas anaeróbias. Até mesmo tecnologias semelhantes podem emitir quantidades de GEE bastantes distintas ao considerar a qualidade do esgoto tratado e os parâmetros operacionais da estação.

Além disso, a emissão de GEE não está restrita apenas a tecnologia de tratamento da fase líquida do esgoto. O processo de tratamento do lodo também deve ser observado. A complexidade aumenta ainda mais, pois os dados de entrada para a estimativa de GEE oriundos do tratamento de lodo são diferentes dos utilizados para o tratamento da fase líquida. Quando estes dados não estão disponíveis, tanto a fase sólida quanto a líquida podem ser estimados, com menor precisão, utilizando-se os mesmos dados de entrada desde que considerados os coeficientes adequados.

Neste contexto, por um lado, avaliar cada estação de tratamento de esgoto considerando todas as suas particularidades requer grande esforço analítico, processamento de cálculo e um grande volume de coleta de informações, por outro lado, metodologias simplificadas, como a apresentada pelo método disponibilizado pelo IPCC (2019), embora coerente com a ordem de grandeza das emissões, podem resultar em tomadas de decisão equivocadas quanto a escolha de rotas tecnológicas de tratamento visando a redução de GEE.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo revisar a metodologia de estimativa de GEEs da ferramenta de cálculo do Programa Brasileiro GHG *Protocol* e do *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2019), a fim de identificar seus pontos fortes e limitações e propor possíveis melhorias adicionais relevantes para as empresas de saneamento que atuam no território brasileiro, compatibilizando o esforço necessário para realização das estimativas com a precisão e detalhamento suficientes para as tomadas de decisão das empresas quanto escolha de rotas tecnológicas de baixa emissão.

OBJETIVO

Revisar e adaptar, para empresas de saneamento brasileiras, os métodos para a estimativa de emissão de GEEs durante o tratamento da fase líquida em estações de tratamento de esgoto, após o lançamento do efluente final e durante o tratamento do lodo. Consolidar uma metodologia de cálculo que seja de viável aplicação e que forneça bases sólidas, possibilitando que os inventários de GEE do setor sejam comparáveis e forneçam dados que corroborem para tomadas de decisão visando o alcance dos compromissos nacionais e adaptação à mudança do clima.

METODOLOGIA

Foi realizada uma revisão das metodologias de cálculo das emissões de GEE oriundas do tratamento de efluentes propostas na ferramenta de cálculo do Programa Brasileiro GHG *Protocol* e no *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2019). A partir desta revisão, da revisão de literatura técnica e científica, foram incorporadas algumas adaptações e recomendações adicionais relevantes para as empresas de saneamento que atuam no território brasileiro. Balanços de massa em sistema de tratamento não mencionados pelas metodologias anteriores foram realizados para a proposição de fatores de emissão. A escolha dos fatores de emissões e métodos de cálculo basearam-se nas seguintes premissas gerais.

- Adoção dos métodos de cálculo e coeficientes que melhor representam as principais rotas tecnológicas para tratamento de esgoto utilizadas pelas empresas de saneamento no Brasil.

- Adoção dos métodos de cálculo que consideram como variáveis de entradas as informações comumente disponíveis nas empresas de saneamento brasileiras.
- Na falta de dados ou método, adota-se a premissa de abordagem mais conservadora quanto à emissão de GEE.

A Tabela 1 resume as informações necessárias para a realização dos cálculos conforme a metodologia proposta neste trabalho. Sempre em que os dados disponíveis permitirem, recomenda-se a utilização do tier mais alto.

Tabela 1: Dados necessários para a estimativa de GEE oriundos do tratamento de esgoto.

TIER	DADOS NECESSÁRIOS
	Emissão de metano (CH₄) durante o tratamento da fase líquida
4	• Volume de esgoto tratado em cada estação • Etapas de tratamento de esgoto da estação • DBO do efluente bruto • DBO da saída de cada etapa do tratamento • DBO do efluente tratado • Massa seca de lodo produzido no tratamento
3	• Volume de esgoto tratado em cada estação • Etapas de tratamento de esgoto da estação • DBO do efluente bruto • DBO da saída de cada etapa do tratamento • DBO do efluente tratado
2	• Volume de esgoto tratado em cada estação • Etapas de tratamento de esgoto da estação • DBO do efluente bruto • DBO do efluente tratado
1	• Volume de esgoto tratado em cada estação • Etapas de tratamento de esgoto da estação
	Emissão de N₂O durante o tratamento e lançamento do esgoto
3	• Volume de esgoto tratado em cada estação • Etapas de tratamento de esgoto da estação • Concentração de NTK do efluente bruto (para unidades com potencial de nitrificação) • Concentração de NTK do efluente tratado • Eficiência de remoção de nitrogênio total (para unidades com potencial de nitrificação)
2	• Volume de esgoto tratado em cada estação • Etapas de tratamento de esgoto da estação • Concentração de NTK do efluente bruto (para unidades com potencial de nitrificação) • Concentração de NTK do efluente tratado
1	• Volume de esgoto tratado em cada estação • Etapas de tratamento de esgoto da estação • População atendida na área de cobertura da estação de tratamento
	Emissão de metano oriundo do tratamento de lodo
3	• Concentração de sólidos suspensos totais afluente ao digestor • Remoção SSV no digestor anaeróbio • Volume de biogás produzido no biodigestor
2	• Concentração de sólidos suspensos totais afluente ao digestor • Remoção SSV no digestor anaeróbio
1	• Sem informações sobre as concentrações de sólidos da linha que alimenta digestores de lodo.
	Recuperação de Metano
2	• Etapas de tratamento que possuem sistema de recuperação/queima de biogás • Tipo de sistema de recuperação/queima de biogás • Eficiência o sistema de recuperação/queima • Tempo de operação do sistema de recuperação/queima de biogás
1	• Etapas de tratamento que possuem sistema de recuperação/queima de biogás • Tipo de sistema de recuperação/queima de biogás

RESULTADOS

EMIÇÃO DE METANO DURANTE O TRATAMENTO DA FASE LÍQUIDA

O cálculo da emissão de metano produzido durante cada etapa do tratamento de efluentes em que há conversão da DBO é calculada pelas equações 1 e 2.

$$\text{Emissão de CH}_4 = B_0 \cdot \text{MCF} \cdot [(DBO_{\text{degradada na etapa}} \cdot \text{Volume}_{\text{esgoto tratado}}) - S] \cdot \frac{1}{1000} \quad \text{equação (1)}$$

$$S = S_{\text{Massa de lodo seca}} \cdot K \cdot 1000 \quad \text{equação (2)}$$

Este cálculo é realizado para cada etapa do processo de tratamento que possui potencial de geração de metano e para o lançamento final. No lançamento final, é considerado como $DBO_{\text{degradada}}$ a $DBO_{\text{remanescente}}$ que será auto depurada no corpo receptor. Os parâmetros dessas equações estão descritos na Tabela 2 e na Tabela 3.

Tabela 2: Descrição dos parâmetros de cálculo da emissão de metano em processos biológicos de tratamento.

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR	DESCRIÇÃO	FONTE
Emissão de CH ₄	$\left[\frac{\text{tonCH}_4}{\text{ano}} \right]$	-	Massa de metano emitida por ano	equação (1)
B ₀	$\left[\frac{\text{kgCH}_4}{\text{kgDBO}} \right]$	0,6	Produção máxima de metano para esgoto doméstico	IPCC (2019)
MCF	adimensional	Tabela 4	Fator de correção de Metano (Methane Correction Factor)	Adaptado de IPCC (2019)
DBO _{degradada}	$\left[\frac{\text{kgDBO}}{\text{m}^3} \right]$	Ver premissas para determinação da DBO degradada	DBO degradada na etapa do processo	Base de dados das operações
Volume _{esgoto tratado}	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{ano}} \right]$		Volume de esgoto tratado no ano do inventário	Base de dados das operações
S	$\left[\frac{\text{kgDBO}}{\text{ano}} \right]$		Conteúdo orgânico retirado com o lodo no ano do inventário. Se não houver informações para o cálculo deve ser considerado igual a 0	Base de dados das operações e Equação
S _{Massa de lodo seca}	$\left[\frac{\text{Ton ST}}{\text{ano}} \right]$		Massa seca de lodo produzido na estação	Base de dados das operações
K	$\left[\frac{\text{kgDBO}}{\text{Kg massaseca}} \right]$	Tabela 3	Fator de conversão para o conteúdo orgânico do lodo	IPCC (2019)

Tabela 3: Fatores de conversão para o conteúdo orgânico do lodo.

TIPO DE LODO	VALOR DE K ¹ $\left[\frac{\text{kgDBO}}{\text{Kg massa seca}} \right]$	FONTE
Estações de tratamento aeróbio com tratamento primário (lodo misto primários e secundários, não tratadas ou tratadas aerobiamente)	0,8	IPCC (2019)
Estações de tratamento aeróbio com tratamento primário e digestão anaeróbia de lodo (lodo misto primário e secundário, tratado anaerobiamente)	1.0	IPCC (2019)
Estações de tratamento aeróbio sem tratamento primário separado	1.16	IPCC (2019)

Valores de “K” propostos pelo IPCC (2019) podem ser utilizados para estação de tratamento de esgoto predominantemente aeróbia. O IPCC (2019) não menciona o valor de K para outros processos, como por exemplo, reatores UASB, lagoas de estabilização ou estações com tratamento sequenciais que geram lodo proveniente de diversas etapas de tratamento. Para estes casos, recomenda-se considerar o conteúdo orgânico retirado com o lodo no ano do inventário (S) igual a zero devido à falta de referências para o valor deste coeficiente. O IPCC (2019) menciona um coeficiente K para lodo primário, neste caso não se recomenda a utilização do coeficiente, mas sim que a eficiência do tratamento primário seja considerada no cálculo da DBO degradada por se tratar de uma medida direta.

O IPCC (2019) menciona o parâmetro *TOW* (*total organically degradable material in domestic wastewater*) como variável para a equação (1) ao invés de $(DBO_{degradada} \cdot Volume_{esgoto\ tratado})$. Também é recomendado pelo IPCC (2019) que seja desconsiderado o conteúdo orgânico que foi transformado em lodo, *S* (*organic component removed from wastewater in the form of sludge*), da carga orgânica total degradável no tratamento (*TOW*), que pode ser bastante representativo em sistemas aeróbios. Isso porque o conteúdo orgânico que é transformado em lodo pode ser desconsiderado no balanço de massa como potencial de formação de GEE.

Entende-se que da mesma forma o conteúdo remanescente no tratamento final deve ser desconsiderado do cálculo da emissão de metano por deixar o sistema inalterado, conforme exemplifica o balanço de massa da Figura 1.

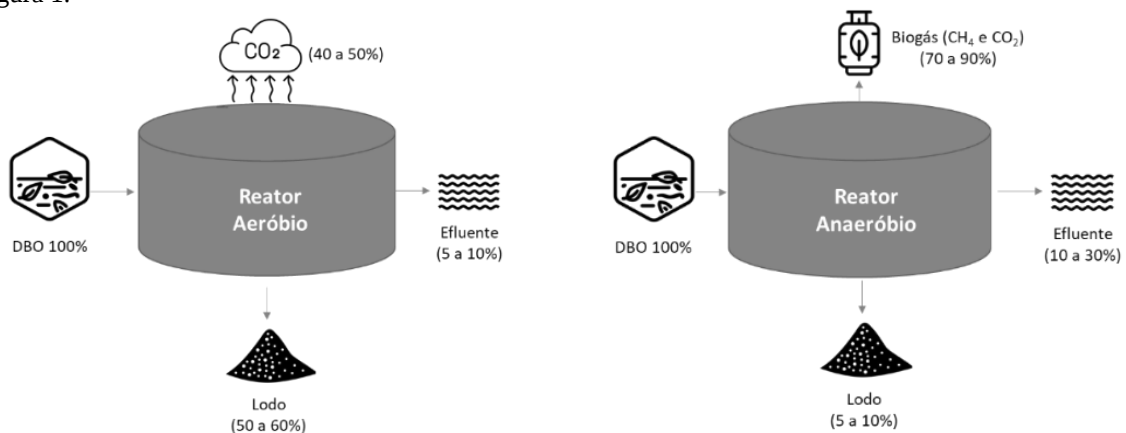


Figura 1: Balanço de massa típico de um processo biológico aeróbico e anaeróbico.

Fonte: VON SPERLING (2012c)

Assim, entende-se que o remanescente da carga orgânica também deve ser desconsiderado no cálculo das emissões da respectiva etapa, e, portanto, o parâmetro *TOW* mencionado pelo IPCC (2019) seria igual a $DBO_{degradada} \cdot Volume_{esgoto\ tratado}$.

O MCF (*Methane correction factor*) varia para cada tipo de processo de tratamento, alguns de seus valores foram adaptados de IPCC (2019) conforme a Tabela 4. Para o mesmo processo de tratamento que possui unidades em série do mesmo tipo, por exemplo, uma série de lagoas facultativas, deve-se considerar o conjunto de unidades como um único processo. Nos últimos anos, diversas novas tecnologias de tratamento de esgoto foram desenvolvidas e patenteadas, para estas tecnologias sugere-se a avaliação à qual tecnologia descrita na Tabela 4 ela mais se assemelha, se necessário, deve-se considerar múltiplas etapas. Também é recomendado que o fornecedor da tecnologia apresente o memorial de cálculo do processo e estabeleça o MCF ou a memória de cálculo para as emissões de GEE específica da tecnologia.

As tecnologias de tratamento aeróbico centralizados que possuem lagoas de decantação e digestores de lodo também foram especificadas na Tabela 4, entretanto, recomenda-se a utilização destes coeficientes apenas para os casos em que não há dados suficientes para o cálculo das emissões oriundas do tratamento de lodo.

Ainda segundo IPCC (2019) ambientes que propiciam o acúmulo de sedimento possuem potencial maior de geração de metano. Para estes ambientes (reservatório, lago ou estuário e outros ambientes lênticos), o MCF a ser proposto é de 0,19. Enquanto ambientes que não propiciam o acúmulo de sedimento (rios, córregos e outros ambientes lóticos) o MCF é de 0,035. Recomenda-se a utilização do MCF de 0,11 para os casos em que não há avaliação do corpo receptor ou dúvida quanto à possibilidade de acúmulo de sedimento.

Tabela 4: Valores do fator de conversão de metano para cada tipo de processo biológico de tratamento.

PROCESSO	MCF
Reator anaeróbio (UASB)	0,80
Lagoas profundas (profundidades maiores que 2m): Lagoa anaeróbia	0,80
Filtro anaeróbio	0,80
Lagoas rasas (profundidades menores que 2m): Lagoa facultativa, polimento e maturação ou Lagoa facultativa aerada (aeração superficial)	0,20
Fossa ou vala	0,50
Sistemas aeróbios (fase líquida): Lodos Ativados, Lagoas Aeradas de mistura completa, filtros percoladores, filtros aerados submersos, MBR, MBBR.	0,03
Lagoas aeradas de mistura completa seguidas de Lagoas de decantação (fase líquida + fase sólida)	0,29 ¹
Sistema aeróbios com digestão anaeróbia de lodo, sem recuperação do biogás (fase líquida + fase sólida)	0,29 ²
Sistema aeróbio com digestão anaeróbia de lodo e recuperação parcial do biogás (fase líquida + fase sólida)	0,21 ³
Esgoto coletado não tratado/DBO remanescente no lançamento	0,035 (Tier 2) 0,19 (Tier 2) 0,11 (Tier 1) ⁴

1. Baseado na estimativa de produção de lodo da lagoa aerada e na parcela do lodo digerida anaerobiamente no fundo da lagoa de decantação segundo JORDÃO E. P., PESSOA C. A. (2014).

2. Considerado a soma do MCF do digestor anaeróbio proposto por NOYOLA, et al (2018) (**0,26**) e MCF e de sistemas aeróbios centralizados proposto pelo IPCC (2019) (**0,03**).

3. Pode variar de acordo com a eficiência de recuperação do metano no biodigestor. Por padrão foi considerado a redução de 31% do MCF no digestor anaeróbio pela recuperação de metano, considerando 38% de perda no meio líquido e 50% de eficiência de queima no queimador tipo aberto, para maiores detalhes veja item 2.2.

4. Valor a ser considerado para o esgoto lançado diretamente em corpos receptores e como a etapa final de qualquer processo de tratamento considerando a DBO remanescente.

A Figura 2 mostra o fluxograma que deve ser observado para a escolhas das equações de cálculo para a emissão de metano durante o tratamento da fase líquida.

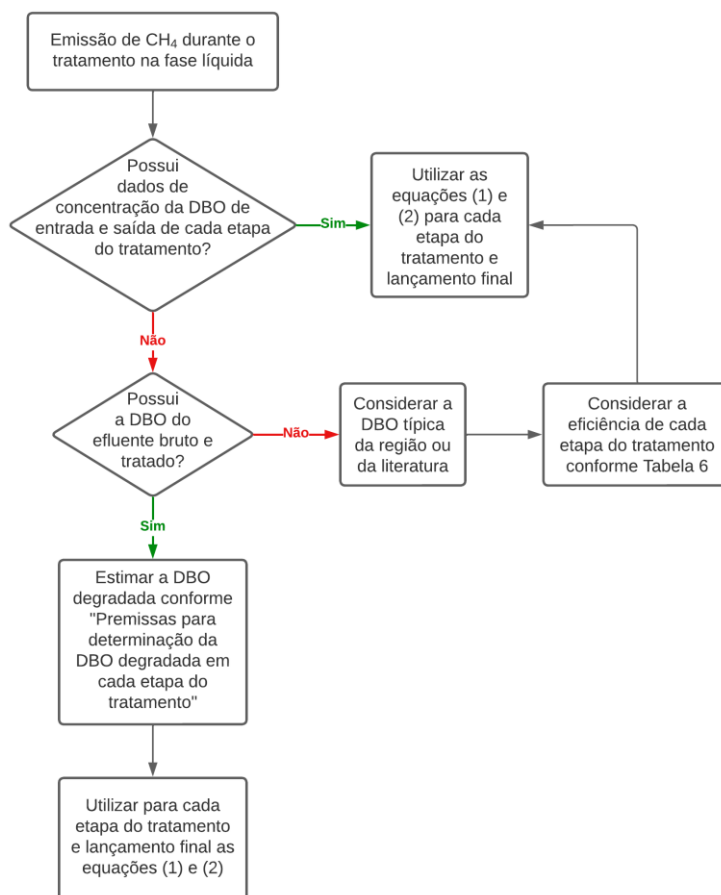


Figura 2: Fluxograma para a escolha do método de cálculo para a emissão de metano durante o tratamento da fase líquida.

PREMISSAS PARA DETERMINAÇÃO DA DBO DEGRADADA EM CADA ETAPA DO TRATAMENTO

A DBO degradada ou removida é determinada pela diferença entre a média da DBO afluente e efluente de **cada etapa de tratamento**, sempre considerando para a etapa seguinte a concentração remanescente da etapa anterior. As equações 3 a 5 exemplifica o cálculo de um processo de duas etapas. Sempre que possível deve-se utilizar os dados medidos em campo.

$$DBO_{\text{degradada 1ª Etapa}} = DBO_{\text{Efluente Bruto}} - DBO_{\text{Efluente da 1ª Etapa}} \quad \text{equação (3)}$$

$$DBO_{\text{degradada 2ª Etapa}} = DBO_{\text{Efluente da 1ª Etapa}} - DBO_{\text{Efluente tratado}} \quad \text{equação (4)}$$

$$DBO_{\text{remanescente}} = DBO_{\text{Efluente tratado}} \quad \text{equação (5)}$$

Tabela 5: Parâmetros para cálculo da DBO degradada dados de monitoramento por etapas

PARÂMETRO	UNIDADE	DESCRIÇÃO	FONTE
$DBO_{\text{Efluente bruto}}$	$\left[\frac{\text{kgDBO}}{\text{m}^3} \right]$	DBO média do efluente bruto que a ETE recebe durante o período do inventário	Base de dados das operações.
$DBO_{\text{Efluente da 1ª Etapa}}$	$\left[\frac{\text{kgDBO}}{\text{m}^3} \right]$	DBO média do efluente após a primeira etapa de tratamento	Base de dados das operações. Ou estimado
$DBO_{\text{Efluente tratado}}$	$\left[\frac{\text{kgDBO}}{\text{m}^3} \right]$	DBO média do efluente tratado que a ETE recebe durante o período do inventário	Base de dados das operações.

Quando na primeira etapa de tratamento ocorre a remoção de DBO em uma unidade de separação de fases, como por exemplo, decantadores ou flotadores primários, a DBO removida nestas unidades deve ser descontada da DBO do efluente bruto para se obter a DBO degradada na primeira etapa de processo biológico. Por outro lado, se o lodo primário é removido e encaminhado a um digestor anaeróbico, a avaliação da geração de metano deverá ser feita conforme discutido no item “emissão de metano durante o tratamento de lodo”. Entretanto, esta avaliação pode não ser possível, pois são necessários dados de monitoramento da concentração de sólidos no digestor. Quando estes dados dos monitoramentos da concentração de sólidos não estiverem disponíveis, a remoção de DBO destas unidades não deve ser descontada para que a emissão de metano seja contabilizada em conjunto com o cálculo da fase líquida adotando-se o MCF adequado da **Tabela 4**.

Para sistemas com tratamento sequenciais em que não há medição da DBO por etapa de tratamento (por exemplo, a medição da DBO efluente da primeira etapa), mas há medição do efluente bruto e do efluente tratado, pode-se estimar a eficiência de cada etapa a partir de valores de eficiência típicos encontradas na literatura.

Para esta estimativa foram encontradas duas propostas realizadas pelas empresas de saneamento. A primeira proposta de cálculo considera os dados da literatura para eficiência de cada etapa do tratamento (Tabela 6) balizados com a eficiência global monitorada.

A segunda proposta considera as eficiências teóricas apenas da primeira etapa que geralmente é a anaeróbia. Esta proposta possui memória de cálculo mais simples, entretanto pode apresentar maior desvio do valor real especialmente em sistemas de tratamento que recebam efluentes domésticos com características distintas das normalmente observadas na literatura, por exemplo ETEs que tem alta contribuição de efluentes industriais.

Para ambos os métodos de cálculo, podem ser consideradas as eficiências típicas encontradas na literatura (Tabela 6), mas se a empresa possui registros de eficiência de alguns seus sistemas, recomenda-se que estas sejam extrapoladas para os demais por já representarem a capacidade de tratamento de esgoto considerando as características do esgoto tratado na região de atuação da empresa, o clima e as condições de operação das unidades.

Tabela 6: Eficiência típicas das principais etapas de tratamento biológico.

PROCESSO	EFICIÊNCIA TÍPICA ϵ_i	FONTE
Reator anaeróbico (UASB)	60-70%	Von Sperling, 2005
Lagoa anaeróbia	50-60%	Von Sperling, 1996
Filtro anaeróbico	68-79%	Pinto, 1995
Lagoa Facultativa	70-85%	Von Sperling, 2002a
Lagoa Facultativa aerada	70-90%	Von Sperling, 2002a
Fossa ou vala	30%	Jordão, 2014
Lodos Ativados	85-93%	Von Sperling, 2002b
Lodos Ativados por aeração prolongada	90-95%	Von Sperling, 2002b
Lagoas aeradas de mistura completa	75-85%	Von Sperling, 2005
Filtro Percolador de baixa carga	85-93%	Von Sperling, 2005
Filtro Percolador de alta carga	80-90%	Von Sperling, 2005
Filtro Aerado Submerso	88-95%	Von Sperling, 2005
Flotação por ar dissolvido	80%	Chernicharo, 2011

ESTIMATIVA DA DBO DEGRADADA CONSIDERANDO A EFICIÊNCIA TÍPICA DE TODAS AS ETAPAS DE TRATAMENTO

Mesmo não tendo monitoramento por etapa de tratamento nos casos em que há múltiplas etapas, é possível a partir da eficiência final observada (ϵ_f) e as eficiências teóricas por etapa de tratamento (ϵ_i), estimar a DBO degradada em cada etapa. Para isso, é preciso encontrar a eficiência teórica corrigida a partir da eficiência real, considerando a remoção teórica da primeira e segunda etapa (ϵ_1) retificadas por um coeficiente de correção (x) da equação 6.

$$\epsilon_f = 1 - (1 - \epsilon_1 x) \cdot (1 - \epsilon_2 x) \quad \text{equação (6)}$$

Em seguida, calcula-se a eficiência monitorada na planta:

$$\varepsilon_f = \frac{DBO_{\text{Efluente bruto}} - DBO_{\text{Efluente tratado}}}{DBO_{\text{Efluente bruto}}} \quad \text{equação (7)}$$

De posse dessas informações é possível calcular um coeficiente de correção (x) aplicando o teorema de Bhaskara ou outro método numérico. No caso do teorema de Bhaskara, o coeficiente de correlação para duas etapas será igual a menor raiz encontrada.

Finalmente a DBO degradada em cada etapa e a DBO remanescente podem ser calculadas pelas seguintes equações:

$$DBO_{\text{degradada 1ª Etapa}} = DBO_{\text{Efluente Bruto}} \cdot \varepsilon_1 \cdot x \quad \text{equação (8)}$$

$$DBO_{\text{degradada 2ª Etapa}} = DBO_{\text{Efluente da 1ª Etapa}} \cdot \varepsilon_2 \cdot x \quad \text{equação (9)}$$

$$DBO_{\text{remanescente}} = DBO_{\text{Efluente bruto}} (1 - \varepsilon_f) \quad \text{equação (10)}$$

Tabela 7: Parâmetros para estimativa da DBO degradada considerando e eficiência típica das múltiplas etapas.

PARÂMETRO	UNIDADE	DESCRIÇÃO	FONTE
$DBO_{\text{Efluente bruto}}$	$\left[\frac{\text{kgDBO}}{\text{m}^3} \right]$	DBO média do efluente bruto que a ETE recebe durante o período do inventário	Base de dados das operações.
$DBO_{\text{Efluente tratado}}$	$\left[\frac{\text{kgDBO}}{\text{m}^3} \right]$	DBO média do efluente tratado que a ETE recebe durante o período do inventário	Base de dados das operações.
ε_f	[%]	Eficiência observada da planta monitorada	Base de dados das operações.
ε_1	[%]	Eficiência teórica da etapa 1	Tabela 6
ε_2	[%]	Eficiência teórica da etapa 2	Tabela 6
x	adimensional	Coeficiente de correção da eficiência teórica em função da eficiência global observada	equação 6

ESTIMATIVA DA DBO DEGRADADA CONSIDERANDO A EFICIÊNCIA TÍPICA DA ETAPA ANAERÓBIA.

Uma maneira mais simples, porém, menos precisa, para estimar a DBO das múltiplas etapas em casos em que não há monitoramento é apenas considerar a eficiência típica da primeira etapa da seguinte forma:

$$DBO_{\text{degradada 1ª Etapa}} = DBO_{\text{Efluente Bruto}} \cdot \varepsilon_1 \quad \text{equação (11)}$$

$$DBO_{\text{degradada 2ª Etapa}} = DBO_{\text{Efluente Bruto}} - DBO_{\text{Efluente da 1ª Etapa}} - DBO_{\text{Efluente tratado}} \quad \text{equação (12)}$$

$$DBO_{\text{remanescente}} = DBO_{\text{Efluente tratado}} \quad \text{equação (13)}$$

Tabela 8: Parâmetros para estimativa da DBO degradada considerando e eficiência típica apenas da primeira etapa

PARÂMETRO	UNIDADE	DESCRIÇÃO	FONTE
$DBO_{\text{Efluente bruto}}$	$\left[\frac{\text{kgDBO}}{\text{m}^3} \right]$	DBO média do efluente bruto que a ETE recebe durante o período do inventário	Base de dados das operações.
ε_1	[%]	Eficiência teórica da etapa 1	Tabela 6
$DBO_{\text{Efluente tratado}}$		DBO média do efluente tratado que a ETE recebe durante o período do inventário	Base de dados das operações.

EMIÇÃO DE ÓXIDO NITROSO DURANTE O TRATAMENTO E LANÇAMENTO DO ESGOTO

A remoção biológica de nitrogênio convencional se inicia quando a partir da hidrólise da matéria orgânica o nitrogênio orgânico é liberado na forma de nitrogênio amoniacal. Na sequência, o processo de nitrificação converte o nitrogênio amoniacal em nitrito (NO_2^-) e este, a nitrato (NO_3^-). A remoção do nitrogênio na fase líquida ocorre efetivamente na desnitrificação, quando os nitratos são reduzidos a nitrogênio gasoso, este que é liberado pela atmosfera.

O nitrogênio orgânico corresponde a grupamentos amina. O nitrogênio orgânico e a amônia, em conjunto, são determinados em laboratório pelo método Kjeldahl, sendo denominado Nitrogênio Total de Kjeldahl (NTK). Assim, no meio líquido (VON SPERLIG, 2016):

- NTK = nitrogênio orgânico + amônia (forma predominante nos esgotos brutos);
- NT = nitrogênio orgânico + amônia + nitrito + nitrato (nitrogênio total).

Nos processos predominantemente aeróbios com remoção biológica de nitrogênio, o óxido nitroso pode ser produzido tanto na zona anóxica, durante a desnitrificação, quanto na zona aeróbia, durante a nitrificação. No entanto, as zonas aeróbias vêm sendo reportadas como maiores emissoras de óxido nitroso do que as zonas anóxicas (YE, PORRO & NOPENS, 2022). Cabe destacar que a nitrificação ocorre quase que sistematicamente nas ETEs de lodos ativados, quando operadas em condições de elevada temperatura nas regiões de clima quente, como é o caso do Brasil (VON SPERLING, 2016).

A emissão de óxido nitroso pode ocorrer de forma direta em sistemas aeróbios ou indireta após o lançamento do efluente no corpo hídrico. Para o cálculo da emissão de óxido nitroso de forma direta em estações predominantemente aeróbias se utiliza a equação 14. Considera-se estações predominantemente aeróbias aquela que possuam pelo menos uma etapa de sistema aeróbio especificado na Tabela 4. Para os demais tipos de tratamento a emissão direta é considerada não significativa devido à baixa capacidade de nitrificação. Para todos os casos, inclusive sistemas predominantemente aeróbios, as emissões indiretas podem ser calculadas pela equação 15.

$$\text{Emissão direta de } \text{N}_2\text{O} = \text{Volume}_{\text{esgoto}} \cdot (\text{N}_{\text{Efluente bruto}} - \text{N}_{\text{Efluente tratado}}) \cdot \text{EF}_{\text{Aeróbio}} \cdot \frac{1}{1000} \cdot \frac{44}{28} \quad \text{equação (14)}$$

$$\text{Emissão indireta de } \text{N}_2\text{O} = \text{Volume}_{\text{esgoto}} \cdot (\text{N}_{\text{Efluente tratado}}) \cdot \text{EF}_{\text{Indireto}} \cdot \frac{1}{1000} \cdot \frac{44}{28} \quad \text{equação (15)}$$

Os parâmetros dessas equações são descritos na Tabela 9.

Tabela 9: Descrição dos parâmetros de cálculo para estimativa de emissão de óxido nitroso a partir de dados de nitrogênio afluente.

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR	DESCRIÇÃO	FONTE
Emissão de N_2O	$\left[\frac{\text{tonN}_2\text{O}}{\text{ano}} \right]$	-	Massa de óxido nitroso emitida por ano	
$\text{N}_{\text{efluente bruto}}$	$\left[\frac{\text{kgN}}{\text{m}^3} \right]$	-	Concentração de NTK	Base de dados das operações.
$\text{N}_{\text{efluente tratado}}$	$\left[\frac{\text{kgN}}{\text{m}^3} \right]$	-	Concentração de NTK	Base de dados das operações.
$\text{EF}_{\text{Aeróbio}}$	$\left[\frac{\text{kg N-N}_2\text{O}}{\text{kg N}} \right]$	0,016 ou equação 16	Fator de emissão tratamento aeróbio	IPCC (2019) Cap. 6.3.1.3 Tabela 6.8A
$\text{EF}_{\text{Indireto}}$	$\left[\frac{\text{kg N-N}_2\text{O}}{\text{kg N}} \right]$	0,005	Fator para emissões indiretas de N_2O após o lançamento final	IPCC (2019) Cap. 6.3.1.3 Tabela 6.8A

Alguns estudos propuseram que o $\text{EF}_{\text{Aeróbio}}$ parece estar relacionado ao desempenho de remoção de nitrogênio total (NT) da planta (DE HAAS AND YE, 2021). Desta forma, sugere-se a utilização da equação encontrada por DE HAAS AND YE (2021) para correção do fator de emissão em casos que a eficiência de remoção de

nitrogênio total ultrapasse 60%. A equação sugere que a emissão pode ser considerada desprezível caso a eficiência de remoção de NT seja superior a 95%.

$$EF_{\text{Aerobio}} = \frac{(-0,0462 \%NT_{\text{removido}} + 4,44)}{100} \quad \text{equação (16)}$$

Tabela 10: Descrição dos parâmetros de cálculo correção do fator de emissão de N₂O em função da eficiência de remoção de nitrogênio total da estação.

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR	DESCRIÇÃO	FONTE
EF		-	Fator de emissão com remoção de N	DE HAAS AND YE (2021)
%NT _{removido}	%	Eficiência de remoção de nitrogênio total na estação	Nitrogênio total removido, considerando eficiência de nitrificação e desnitrificação.	Base de dados das operações

Quando não estiver disponível os resultados de análises de concentração de nitrogênio afluente da estação de tratamento, também pode ser considerada a concentração de nitrogênio típica para esgotos da região em que a ETE se encontra estimar via equação 17, que considera a população atendida.

$$N_{\text{efluente}} = \frac{P_{\text{Trat}} \cdot P_{\text{prot supply}} \cdot F_{\text{PC}} \cdot F_{\text{NPR}} \cdot F_{\text{non}} \cdot F_{\text{ind com}}}{\text{Volume de esgoto tratado na ETE}} \quad \text{equação (17)}$$

Tabela 11: Descrição dos parâmetros de cálculo para estimativa de emissão de óxido nitroso a partir de dados de população atendida.

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR	DESCRIÇÃO	FONTE
P_{trat}	habitante	-	População atendida; (estimativa IBGE para 2020 e proporção feita para cada ETE feita por números de economias ativas conectadas a ETE)	Base de dados das operações.
$P_{\text{prot supply}}$	$\left[\frac{\text{kg proteína}}{\text{habitante} \cdot \text{ano}} \right]$	0,94	Fornecimento médio de proteína para o Brasil (94g/pessoa/dia)	Tabela 43. FAO, 2021
F_{PC}	%	0,92	% da proteína ofertada que foi consumida	IPCC (2019)
F_{NPR}	$\left[\frac{\text{kg N}}{\text{kg proteína}} \right]$	0,16	fração de Nitrogênio presente na proteína	IPCC, 2019, Cap. 6.3.1.3
F_{non}	adimensional	1,00	fator de ajuste para proteína não consumida	IPCC, 2019, Cap. 6.3.1.3 Tabela 6.11A
$F_{\text{ind com}}$	adimensional	1,25	fator de ajuste para contribuição de efluente industrial e comercial	IPCC, 2019, Cap. 6.3.1.3 Tabela 6.11A

A Figura 3 mostra o fluxograma que deve ser observado para a escolhas das equações de cálculo para a emissão de óxido nitroso durante o tratamento da fase líquida

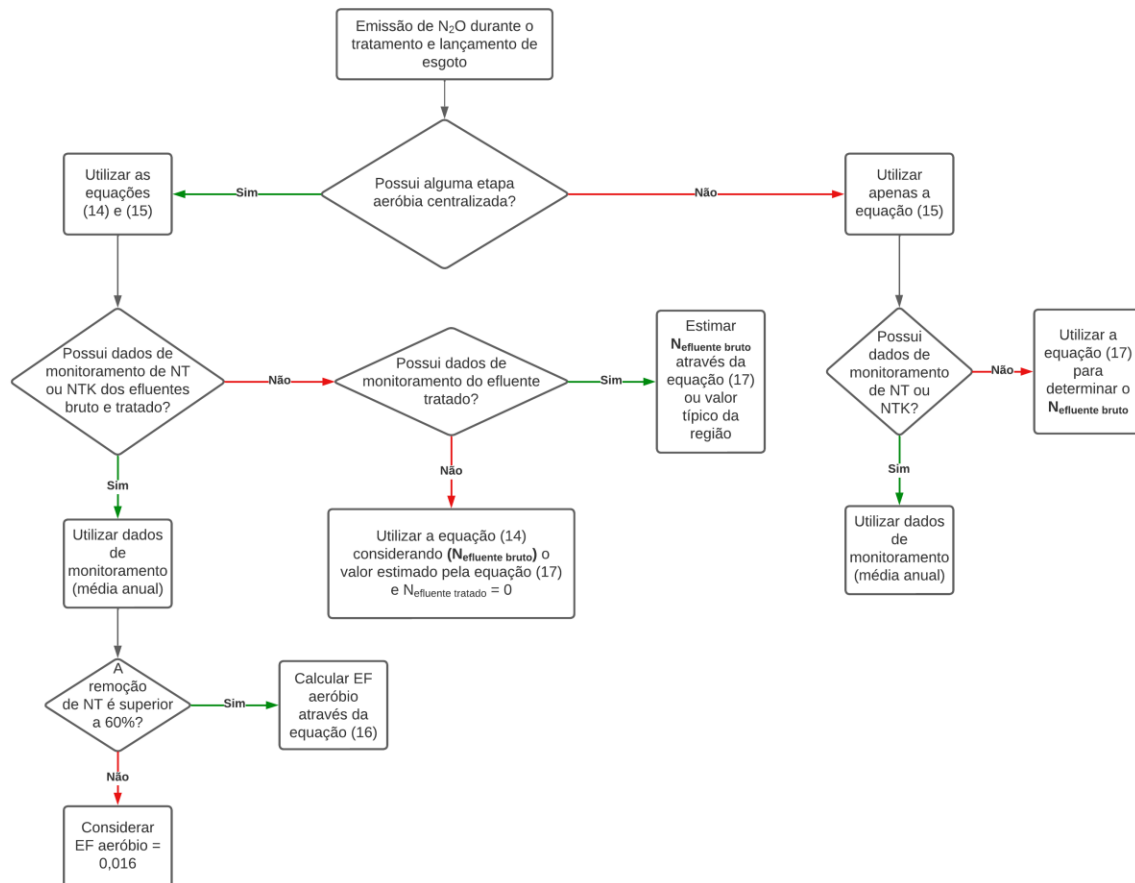


Figura 3: Fluxograma para a escolha do método de cálculo para a emissão de óxido nitroso durante o tratamento da fase líquida.

EMIÇÃO DE METANO DURANTE O TRATAMENTO DE LODO

Algumas plantas de tratamento de esgoto aeróbias geram quantidades significativas de lodo que, muitas vezes, são digeridos em biodigestores anaeróbios. O tratamento anaeróbio do lodo pode estar ligado à recuperação e à combustão do metano para obter energia e, nestes casos, as emissões de gases de efeito estufa do processo devem ser informadas no **Setor de Energia (IPCC, 2019 pág 6.13)**. Quando o lodo do tratamento dos efluentes é transferido para uma instalação anaeróbia que está codigerindo o lodo com **resíduos sólidos urbanos** ou outros, as emissões de GEE relacionadas devem ser relatadas na **categoria resíduos sólidos**.

Quando houver recuperação de metano da digestão anaeróbia, pela queima em flares por exemplo, deve-se subtrair a quantidade de gás recuperado da quantidade de metano gerado, e assim estimar a emissão líquida. A determinação da quantidade de metano recuperado será discutida no tópico “recuperação de metano”.

As fórmulas para encontrar as emissões oriundas dos biodigestores anaeróbios foram baseadas no trabalho “*Process Design Manual For Small Wastewater Works*” WRC (2009), segundo este trabalho a digestão estável normalmente produz gás contendo cerca de 65% de metano e 35% de dióxido de carbono a uma taxa de 0,8 a 1,0 m³/kg de sólidos voláteis destruídos. Uma boa digestão normalmente reduz o teor de sólidos voláteis em cerca de 40% a 55%. De acordo com VON SPERLING (2012), a relação entre SSV/SST em sistemas de lodos ativados convencionais está em torno de 0,70 a 0,85 gSSV/gSST. Portanto, as estimativas da produção de metano em biodigestores anaeróbios de lodo por ser feita pelas equações 18 a 21:

$$SSV_r = SST_{\text{afluente}} \cdot R_{SSV} \cdot F \quad \text{equação (18)}$$

$$Q_{\text{biogás}} = V_{gs} \cdot SSV_r \quad \text{equação (19)}$$

$$Q_{CH_4} = \%CH_4 \cdot Q_{\text{biogás}} \cdot \rho_{CH_4} \quad \text{equação (20)}$$

$$\text{Emissão de } CH_4 = Q_{CH_4} \cdot \frac{365}{1000} \quad \text{equação (21)}$$

A Tabela 12 apresenta a descrição das variáveis das equações 18 a 21, e os valores *default* de alguns parâmetros para ser utilizado quando não houver medições em campo ou parâmetros definidos para a planta avaliada.

Tabela 12: Descrição dos parâmetros de cálculo da emissão de metano durante o tratamento de lodo

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR	DESCRIÇÃO	FONTE
Emissão de CH_4	$\left[\frac{\text{ton}CH_4}{\text{ano}} \right]$	-	Massa de metano emitida por ano	Equação 21
SSV_r	$\left[\frac{\text{kgSSV}}{\text{dia}} \right]$		Carga de SSV removida no digestor	Equação 18
SST_{afluente}	$\left[\frac{\text{kgSST}}{\text{dia}} \right]$		Concentração de SST afluente a ETE	Base de dados das operações
R_{SSV}	%	55% ¹	Remoção SSV no digestor anaeróbio	Process Design Manual For Small Wastewater Works” WRC (2009)
F	$\left[\frac{\text{kgSSV}}{\text{kgSST}} \right]$	75% ¹	Relação de sólidos suspensos voláteis por sólidos suspensos totais	Process Design Manual For Small Wastewater Works” WRC (2009)
$Q_{\text{biogás}}$	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \right]$		Volume de biogás produzido	Equação 19
V_{gs}	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kgSSV}} \right]$	1 ¹	Volume gás específico ao SSV_r	Process Design Manual For Small Wastewater Works” WRC (2009)
Q_{CH_4}	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{dia}} \right]$		Quantidade de metano produzido na biodigestão	Equação 20
$\%CH_4$	%	65% ¹	Porcentagem de CH_4 encontrado no biogás de biodigestores	Process Design Manual For Small Wastewater Works” WRC (2009)
ρ_{CH_4}	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	0,657	densidade do metano	Process Design Manual For Small Wastewater Works” WRC (2009)

1. Valores podem ser corrigidos com medições in loco da estação.

A Figura 4 mostra o fluxograma que deve ser observado para a escolha das equações de cálculo para a emissão de metano durante o tratamento do lodo gerado nas ETEs

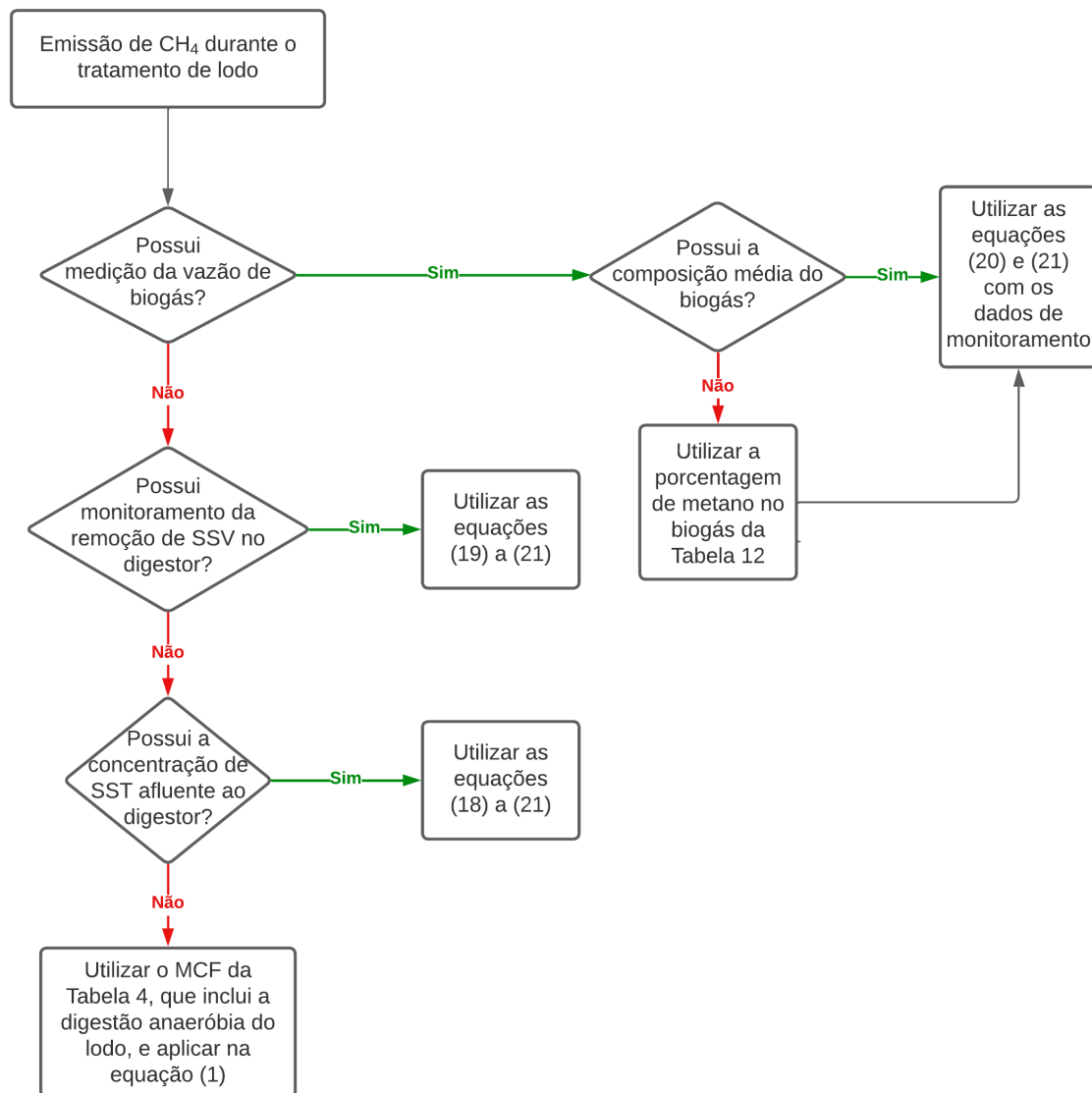


Figura 4: Fluxograma para a escolha do método de cálculo para a emissão de metano durante o tratamento do lodo

RECUPERAÇÃO DE METANO

Nos casos em que a ETE realiza a medição de biogás e análises entre as etapas de tratamento, estas informações devem ser utilizadas, caso não tenha essas informações, então a estimativa da recuperação do metano pode ser calculada conforme a equação 22. Os parâmetros da equação são descritos na Tabela 13.

$$R = \text{Emissão de CH}_4 \cdot (1 - \text{perda}) \cdot T_{\text{manu}} \cdot \eta_q \quad \text{equação (22)}$$

Tabela 13: Descrição dos parâmetros de cálculo recuperação de metano

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR	DESCRIÇÃO	FONTE
R	$\left[\frac{\text{tonCH}_4}{\text{ano}}\right]$		Metano Recuperado	Equação 22
Emissão de CH ₄	$\left[\frac{\text{tonCH}_4}{\text{ano}}\right]$		Emissão estimada de metano total (sem recuperação) da etapa a que possui sistema de recuperação.	Equação 1 para fase líquida e equação 21 para tratamento do lodo.
T _{manu}	[%]		Fração anual corresponde ao tempo que o queimador ficou funcionando durante o ano do inventariado	Base de dados das operações
Perda	[%]	38%	Perda devido ao metano diluído na fase líquida	SOUZA (2010)
η _q	[%]	Queimadores abertos não enclausurados de combustão incompleta: 50% Queimadores enclausurados: 99% Moto geradores utilizados para aproveitamento energético: 80% ou de acordo com o fabricante do equipamento e/ou medições locais.	Corresponde à eficiência do queimador.	-

Durante a queima do metano é produzido gás carbônico e este deverá ser contabilizado como gás carbônico biogênico, por se tratar de emissões evitáveis. A reação de combustão do metano pode ser simplificada da seguinte forma:



A massa de gás carbônico biogênico gerada durante a combustão em função do metano recuperado é dada pela Equação 24.

$$\text{CO}_2\text{Biogênico} = R \cdot \frac{\text{MM}_{\text{CO}_2}}{\text{MM}_{\text{CH}_4}} \quad \text{equação (24)}$$

Tabela 14: Parâmetros para cálculo do CO₂ biogênico gerado durante a combustão do metano

PARÂMETRO	VALOR	UNIDADE	DESCRIÇÃO	FONTE
CO ₂ Biogênico		$\left[\frac{\text{tonCO}_2}{\text{ano}}\right]$	CO ₂ biogênico gerado durante a queima do metano recuperado	Equação 24
R		$\left[\frac{\text{tonCH}_4}{\text{ano}}\right]$	Metano recuperado	Equação 22
MM _{CH₄}	16,04	$\left[\frac{\text{gCH}_4}{\text{mol}}\right]$	Massa molar do metano	
MM _{CO₂}	44,01	$\left[\frac{\text{gCO}_2}{\text{mol}}\right]$	Massa molar do gás carbônico	

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O trabalho adaptou a metodologia internacional divulgada pelo IPCC (2019) às realidades tecnológicas de tratamento de esgotamento sanitário praticados no Brasil, do ponto de vista dos prestadores de serviços de

saneamento, incorporando tecnologias não contempladas no IPCC, comuns no país, bem como, uniformizando os parâmetros a serem adotados para as estimativas das emissões. Adicionalmente, foram aprimorados fatores de emissão de metano, em especial o MCF, e o fator de emissão de óxido nitroso.

Este trabalho fornece uma orientação clara e aderente às realidades de tratamento e monitoramento das estações brasileiras, possibilitando um aprimoramento dos inventários de emissão de gases de efeito estufa do setor. Desta forma, as companhias de saneamento poderão conduzir ações mais assertivas de redução e controle destas emissões, contribuindo para minimizar os impactos ambientais decorrentes de suas atividades.

Para a adoção das premissas, no caso da ausência de dados, tomou-se o cuidado de adotar premissas mais conservadoras, de forma a não penalizar quem faz o controle dos dados de entrada, bem como a incentivar o monitoramento desses parâmetros nas estações.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES.

Esta revisão e adaptação dos métodos de estimativa de emissões de GEE do tratamento de esgotos deve permitir que empresas do setor de saneamento realizem benchmarking mais precisos e confiáveis. Apesar dos avanços, ainda existem diversos desafios para o setor de saneamento quanto ao monitoramento e controle das emissões de GEE, dentre eles, destacamos os seguintes:

- Determinação de metodologia mais robusta das emissões de óxido nitroso por tipo de tecnologia.
- Avaliação de fatores de conversão para o conteúdo orgânico do lodo (K) dos diversos fluxogramas de ETE, pois o IPCC (2019) traz somente a estimativa de plantas aeróbias.
- Instrumentos e técnicas de medição e acompanhamento do metano produzido e recuperado em reatores anaeróbios e biodigestores de lodo.
- Avaliação das emissões globais, considerando todos os escopos (fase líquida, fase sólidos, geração de resíduos, consumo de energia, consumo de produtos químicos) de cada processo para subsidiar tecnicamente a tomada de decisão da escolha de alternativa.
- Ferramenta de cálculo para a estimativa de emissões de ETEs que facilite a inserção de grande quantidade de dados em massa, visto que os concessionários de saneamento possuem entre dezenas e centenas de ETEs.
- Ferramenta de cálculo configurável quanto a atualização de vários tiers dependendo da disponibilidade de dados de cada estação de tratamento de esgoto.
- Método para estimativa de emissão de GEE em leitos de secagem do lodo.
- Método para estimativa de emissão de GEE devido a destinação do lodo em agricultura, e compostagem.
- Emissão de metano em lançamentos de efluente tratado em solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ATV-DVWK Standard. A 131E (2000). Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants.
2. CHERNICHARO, C.A.L (2011). Princípios do tratamento biológico de água residuárias. Vol.5. Reatores anaeróbios. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG. 2.ed. 379 p
3. DE HAAS D. AND YE L. (2021). Nitrous oxide emissions from wastewater treatment: a case for variable emission factors. Water E-Journal (Online Journal of the Australian Water Association), 6(2), 2021, <https://doi.org/10.21139/wej.2021.008>
4. FAO. 2021. World Food and Agriculture - Statistical Yearbook 2021. Rome.
5. FILIPPINI, R. M. K.; Waiss, T. C. F.; Lopardo, N. (2018) Análise de sensibilidade para alteração do método para estimativa de emissões de gases de efeito estufa no tratamento de efluentes. In: XIV - Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2018, Foz do Iguaçu.
6. GHG Protocol (2020). Ferramenta de Cálculo Programa Brasileiro GHG Protocol. Disponível em: <https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>.
7. GUANG-HAO CHEN, MARK C.M. VAN LOOSDRECHT, G.A. EKAMA, DAMIR BRDJANOVIC (2022). Biological Wastewater Treatment: 2nd Edition
8. IPCC (2006). Intergovernmental Panel on Climate Change. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.

9. IPCC (2019); Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Deborah Bartram (USA), Michael D. Short (Australia), Yoshitaka Ebie (Japan), Juraj Farkaš (Slovakia), Céline Gueguen (France), Gregory M. Peters (Sweden), Nuria Mariana Zanzottera (Argentina), M. Karthik (India)
10. JORDÃO E. P., PESSOA C. A. (2014). Tratamento de esgotos domésticos - 7ª edição
11. LOBATO, L. C. S. (2011) Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico. 2011. 184 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG.
12. MENDONÇA, G. F. (2021). Emissões diretas de gases de efeito estufa nas estações de tratamento de esgoto de Pernambuco. 2021. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco. Recife – PE.
13. NOYOLA, A., PAREDES, M.G., GÜERECA, L.P., MOLINA, L.T., ZAVALA M. (2018). Methane correction factors for estimating emissions from aerobic wastewater treatment facilities based on field data in Mexico and on literature review.
14. PINTO, J.D.S (1995). Tratamento de esgotos sanitários em filtro anaeróbio utilizando escória de alto-forno como meio de suporte. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG. Belo Horizonte.
15. SOUZA, C. L. (2010) Estudo das Rotas de Formação, Transporte e Consumo dos Gases Metano e Sulfeto de Hidrogênio Resultantes do Tratamento de Esgoto Doméstico em Reatores UASB. Belo Horizonte: Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Escola de Engenharia, 2010.
16. TT389/09 (2009) Process Design Manual For Small Wastewater Works. 1st Ed, Pretoria, RSA.
17. VON SPERLING & ANDREOLI. Sludge Treatment and disposal (2007)
18. VON SPERLING, M. (2002a) Princípios do tratamento biológico de água residuárias. Vol.3. Lagoas de estabilização. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG. 2.ed. 196 p.
19. VON SPERLING, M. (2002b) Princípios do tratamento biológico de água residuárias. Vol.4. Lodos ativados. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG. 2.ed. 428 p.
20. VON SPERLING, M. (2002c) Princípios do tratamento biológico de água residuárias. Vol.5. Reatores Anaeróbios. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG. 2.ed. 380 p.
21. VON SPERLING, M. (2005) Princípios do tratamento biológico de água residuárias. Vol.1. Introdução à qualidade das águas e tratamento de esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG. 3.ed. 452 p.
22. VON SPERLING, M. (2012). Lodos Ativados. Belo Horizonte: Editora UFMG.
23. YE, L.; PORRO, J.; NOPENS, I. Quantification and modelling of fugitive greenhouse gas emissions from urban water systems.