

Avaliação do potencial da ferramenta *Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring Tool* para estimativas de emissões de gases de efeito estufa em arranjos típicos de tratamento de esgoto sanitário no Brasil

Evaluation of the potential of the Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring Tool for greenhouse gas emissions estimation in typical wastewater treatment arrangements in Brazil

Sebastian Rosenfeldt^{1,*} , Bruno Eduardo dos Santos Silva² , Carolina Bayer Gomes Cabral³ ,
Christopher Platzer⁴ 

RESUMO

O cálculo das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor de tratamento de esgotos é um desafio devido à abordagem generalista do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o que dificulta a aplicação por parte dos técnicos responsáveis pelos inventários das empresas de saneamento. Para superar esse obstáculo, desenvolveu-se a ferramenta *Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring* (ECAM), que integra todas as equações e variáveis necessárias em uma única plataforma. Este estudo teve o objetivo de avaliar a usabilidade dessa ferramenta, utilizando-a para calcular as emissões em quatro cenários típicos de tratamento no Brasil: lodos ativados com aeração prolongada (LAAP), lodos ativados convencionais combinados com digestores anaeróbios de lodo (LA + DL) e reatores UASB seguidos por lodos ativados convencionais (UASB + LA), com e sem queima de biogás. Os resultados indicaram que a ferramenta simplifica o processo para os usuários, incorporando as equações do IPCC e sugerindo valores adicionais para variáveis não indicadas pela instituição. Essa otimização foi considerada positiva, embora seja necessário ter cuidado ao combinar diferentes referências, especialmente no cálculo da carga orgânica removida como lodo nas etapas de tratamento. A principal limitação identificada foi a falta de atualização dos valores de potencial de aquecimento global (GWP). Para esse caso, recomendou-se

ABSTRACT

Calculating greenhouse gas (GHG) emissions in the wastewater treatment sector poses a challenge due to the generalized approach of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), making it difficult to be applied by technicians responsible for inventories in sanitation companies. To overcome this obstacle, the Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring (ECAM) tool was developed, integrating all the necessary equations and variables into a single platform. This study aimed to assess the usability of this tool by using it to calculate emissions in four typical treatment scenarios in Brazil: extended aeration activated sludge (LAAP), conventional activated sludge combined with anaerobic sludge digesters (LA + DL), and Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactors followed by conventional activated sludge (UASB + LA), with and without biogas combustion. The results indicated that the tool simplifies the process for users by incorporating the IPCC equations and suggesting additional values for variables not covered by the institution. This optimization was deemed positive, although caution is needed when combining different references, especially in calculating the organic load removed as sludge in treatment stages. The main limitation identified was the lack of updated values for global warming potentials (GWP). In such cases, it was recommended to export emissions to an external

¹Engenheiro Químico formado na Universidade de Ciências Aplicadas (FHTW) Berlim. Doutorando na Universidade Técnica de Berlim (TU Berlin). Sócio da Rotária do Brasil.

²Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com período sanduíche pela Universidade de Melbourne (UoM). Engenheiro Sanitarista da Rotária do Brasil.

³Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (PPGEA/UFSC). Doutoranda em Engenharia Sanitária pela Universidade Técnica de Berlim (TU Berlin). Sócia da Rotária do Brasil.

⁴Engenheiro Civil pela Universidade Técnica de Munique (TUM). Doutor em Engenharia Sanitária pela Universidade Técnica de Berlim (TU Berlin). Sócio-diretor da Rotária do Brasil.

*Endereço para correspondência: Rua Teodoro Manoel Dias, 421 - Santo Antônio de Lisboa. Florianópolis, SC. CEP: 88050-540. E-mail: sebastian@rotaria.net

exportar as emissões para uma planilha externa e convertê-las eventualmente para carbono equivalente. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a ferramenta ECAM tem grande potencial para facilitar o cálculo das emissões de GEE pelos técnicos responsáveis pelos inventários das empresas de saneamento.

Palavras-chave: emissões de gases de efeito estufa em ETEs; ferramenta ECAM; inventários de gases de efeito estufa; tratamento de esgotos.

spreadsheet and eventually convert them to carbon equivalent. Based on the findings, it can be concluded that the ECAM tool holds great potential to ease the calculation of GHG emissions for technicians responsible for inventories in sanitation companies.

Keywords: greenhouse gas emissions in WWTPs; ECAM tool; greenhouse gas inventories; wastewater treatment.

1. INTRODUÇÃO

O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*) estabelece que as atividades do setor de esgotamento sanitário contribuem, principalmente, com emissões de óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), provenientes de diferentes processos e etapas de coleta, tratamento e despejo de esgotos (IPCC, 2006, 2019).

No tratamento de esgotos, a geração de CO_2 está associada à queima de combustíveis fósseis. Isso ocorre indiretamente durante o consumo de energia elétrica, o transporte de subprodutos como lodo e a combustão de motores dentro de estações de tratamento de esgotos (ETEs). Processos de alto consumo energético, como a aeração, contribuem para emissões significativas de CO_2 (ROTHAUSEN e CONWAY, 2011). O CO_2 também pode ser emitido a partir de fontes biogênicas, relacionadas ao ciclo natural do carbono, mas que não são consideradas nos inventários de gases de efeito estufa (GEE) (IPCC, 2006, 2019).

O CH_4 é gerado a partir da decomposição da matéria orgânica em condições anaeróbicas, e pode ser responsável por emissões significativas na atmosfera se não for capturado e queimado. É gerado no tratamento de esgotos e na gestão de lodos produzidos (DAELMAN *et al.*, 2013; FOLEY, 2015). O CH_4 de origem não fóssil tem potencial de aquecimento global (GWP, *global warming potential*) 27 vezes maior do que o CO_2 (IPCC, 2021).

O N_2O é gerado principalmente pela degradação de compostos nitrogenados presentes no efluente, como nitratos e proteínas, durante os processos de nitrificação e desnitrificação. Nas ETEs, a emissão ocorre predominantemente durante a aeração (MELLO *et al.*, 2013), especialmente em unidades de lodos ativados projetadas para remover

carga orgânica, mas que não controlam adequadamente a desnitrificação (AHN *et al.*, 2010; KAMPSCHREUR *et al.*, 2009). O N_2O tem GWP 273 vezes maior do que o CO_2 (IPCC, 2021).

O IPCC estabelece critérios para cálculo das emissões de GEE no tratamento de esgotos em seu *Guia para Inventários Nacionais* (IPCC, 2006, 2019), complementado e atualizado regularmente. O guia fornece equações e fatores de emissão (FEs) para cada tecnologia de tratamento, com base em estudos em escala real e piloto. No entanto, os fatores sugeridos não consideram as condições específicas de cada ETE nem a combinação de tecnologias de tratamento. O GWP dos GEE é fornecido nos relatórios de avaliação (ARs) do IPCC.

O cálculo das emissões de GEE provenientes do tratamento de esgotos com base nas diretrizes do IPCC pode ser complexo, devido ao grande número de variáveis e considerações que devem ser feitas pelo inventariante. O projeto *Water and Wastewater Companies for Climate Mitigation* (WaCCliM) desenvolveu a ferramenta *Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring* (ECAM), específica para as emissões do setor de saneamento e que incorpora as diretrizes do IPCC, complementando-as quando necessário.

Nesse contexto, este artigo tem o objetivo de avaliar a usabilidade da ferramenta ECAM para a estimativa de emissões de GEE nas atividades associadas ao tratamento de esgoto sanitário no Brasil, verificando sua capacidade de complementar o método do IPCC.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Com o objetivo de avaliar a possibilidade de utilizar a metodologia do IPCC (2019) por meio da ferramenta ECAM (disponível em: <https://climatesmartwater.org/ecam/>), os

autores analisaram os parâmetros de entrada utilizados nos cálculos da ferramenta. Discutiram-se aspectos como os FEs de CH₄ e N₂O, o FE relacionado ao consumo de energia elétrica, as variáveis relacionadas à remoção de lodo para redução da carga orgânica e o potencial de aquecimento global dos GEE.

Em seguida, a ferramenta foi utilizada para calcular as emissões de GEE de tecnologias comuns no tratamento de esgoto no Brasil, incluindo lodos ativados com aeração prolongada (LAAP), lodos ativados convencional em combinação com digestores anaeróbios de lodo (LA + DL) e reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB) seguidos de lodos ativados convencional (UASB + LA). Para fins de comparação, os autores também realizaram cálculos das mesmas emissões em planilha externa.

O escopo definido para as emissões provenientes do tratamento de esgoto incluiu o consumo de energia elétrica da rede, o processo de tratamento do esgoto, a geração de biogás e o despejo do efluente tratado. Conforme orientações do IPCC (2006, 2019), as emissões biogênicas resultantes da queima do biogás não foram consideradas. O estudo adotou população padrão de 100.000 habitantes, resultando em carga afluente de demanda bioquímica de oxigênio de 5 dias (DBO₅) de 1.825.000 kg/ano e carga de nitrogênio de 706.846 kg/ano. O consumo de energia elétrica para a aeração foi estimado com base no consumo específico, conforme von Sperling (2007).

Para os arranjos com digestor de lodo e reator UASB, considerou-se a geração de biogás, que foi coletado e queimado. Adicionalmente, demonstrou-se o impacto da emissão de biogás gerado no reator UASB quando não há sistema de coleta e queima em operação. Ao final, as emissões são apresentadas em kgCH₄, kgN₂O e kgCO₂, sendo também convertidas para kgCO₂ equivalente pelo ECAM, utilizando-se o GWP do AR do IPCC selecionado pelo usuário.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Avaliação dos parâmetros de entrada da ferramenta ECAM

Apresenta os parâmetros de entrada da ferramenta ECAM para o Brasil. Na coluna “análise/observações”, são avaliados

os valores sugeridos. Na coluna “adotado”, os autores selecionaram os valores a serem utilizados na ferramenta.

3.2. Aplicabilidade para cenários típicos de tratamento de esgotos no Brasil

Após selecionar os parâmetros gerais da ferramenta, foram gerados quatro cenários típicos no ECAM, um para cada arranjo tecnológico: LAAP; LA + DL; UASB + LA com queima de biogás; e UASB + LA sem queima de biogás. Adicionando-se informações sobre a população contribuinte, a ferramenta calcula automaticamente as cargas afluentes.

Em seguida, para cada arranjo, foi necessário informar a eficiência de remoção das cargas (**Tabela 1**). A ferramenta oferece uma seleção de eficiências padrão em um menu suspenso, que resulta na carga do efluente tratado e, indiretamente, na carga removida. Não é possível personalizar os valores das eficiências diretamente, mas isso não prejudica o resultado na prática, pois as cargas do efluente podem ser alteradas diretamente pelo usuário.

Uma vez definidas as eficiências, prosseguiu-se com a determinação dos FEs de CH₄ e N₂O relacionados aos processos de tratamento e ao despejo do efluente (**Tabela 2**). O ECAM sugere FE para processos de tratamento com base no IPCC (2016, 2019), mas para arranjos que combinam mais de um processo, como o UASB+LA, não há FEs disponíveis. Por isso, calcularam-se FEs compostos utilizando-se as Equações 1, 2 e 3, de Silva *et al.* (2022), especificadas a partir das equações “6.1 Updated” e “6.1A New”, do IPCC (2019). As equações consideram as eficiências de remoção de carga no primeiro processo e a parcela de DBO₅ removida como lodo no segundo. Nesses casos, a retirada de lodo adotada foi de 292.000 kgDBO/ano para a tecnologia de lodos ativados, quando antecedida pelo reator UASB.

Tabela 1 – Eficiências de remoção de DBO₅ e N_{total} adotadas pelos autores.

Processo de Tratamento	Remoção de DBO ₅		Remoção de N _{total}	
	von Sperling (2007)	Adotado	von Sperling (2007)	Adotado
LAAP	90 - 97 %	90 %	< 60 %	50 %
LA + DL	85 - 93 %	90 %	< 60 %	50 %
UASB + LA	83 - 93 %	90 %	< 60 %	50 %

Fonte: adaptado a partir de von Sperling (2005).

É importante ressaltar que o FE sugerido pelo IPCC (2019) para o processo UASB não corresponde à realidade brasileira, como indicado por Souza (2010), que identificou influência considerável de fatores como carga orgânica, temperatura e pH do reator.

A **Figura 1** apresenta as emissões calculadas pelo ECAM com base nas premissas assumidas e que podem ser disponibilizadas por tipo de gás, por CO₂ equivalente, ou ainda organizadas por categoria de emissão. A menor emissão ocorre no processo de lodo ativado com aeração prolongada, cujo total de 6.545.347 kgCO₂eq/a é composto por 93,5 % de N₂O, seguido por 4,2 % de CO₂ e 2,3 % de CH₄.

3.3. Limitações relacionadas ao potencial de aquecimento global

Conforme identificado na **Tabela 3**, a ferramenta ECAM permite a customização de diversos parâmetros. Entretanto, a seleção dos potenciais de aquecimento global (GWP) é limitada aos ARs do IPCC disponíveis na ferramenta. Na data de elaboração deste artigo, o AR5 era o relatório mais recentemente habilitado para seleção, apesar de o IPCC já ter disponibilizado uma versão mais atualizada (**Tabela 4**).

Por esse motivo, realizaram-se os mesmos cálculos que resultaram na **Figura 1** em uma planilha externa, mas com a adoção dos GWPs mais atualizados (**Figura 2**), que são menores. Essa limitação resultou nas diferenças observadas na **Figura 2**. Para não superestimar as emissões, recomenda-se, portanto, que o usuário exporte os resultados da ferramenta ECAM por tipo de gás e realize a conversão para carbono equivalente em outra ferramenta de cálculo.

3.4. Limitações relacionadas ao cálculo da carga e demanda bioquímica de oxigênio removida como lodo

Ao calcular as emissões de CH₄ no tratamento em ETE aeróbia centralizada, é importante considerar a quantidade

de carga orgânica removida com o lodo (S_j). Essa quantidade deve ser subtraída da carga total recebida no tratamento (DBO_j) antes de aplicar o FE (**Equação 1**). O mesmo conceito foi aplicado para calcular os FEs compostos na **Tabela 3**.

$$E_{CH_4, j} = (DBO_j - S_j) \cdot FE_{CH_4, j} - R_j \quad (1)$$

Em que:

E_{CH_4} : Emissões de CH₄ de uma etapa/sistema de tratamento/despejo (kg_{CH₄}/a).

DBO: Carga de DBO afluente a uma etapa/sistema de tratamento/despejo (kg_{DBO}/a).

S: Carga de DBO removida como lodo a partir de uma etapa/sistema de tratamento de esgotos (kg_{DBO}/a).

FE_{CH_4} : Fator de emissão de metano (kg_{CH₄}/kg_{DBO}).

R: Quantidade de metano recuperado ou queimado a partir de uma etapa/sistema de tratamento de esgotos (kg_{CH₄}/a).

j: Cada etapa/sistema de tratamento/despejo de esgotos.

Essa consideração é aplicável, de acordo com o IPCC (2019), quando as linhas de tratamento de esgoto e lodo são separadas, como no caso de lodos ativados com decantação primária e estabilização anaeróbia de

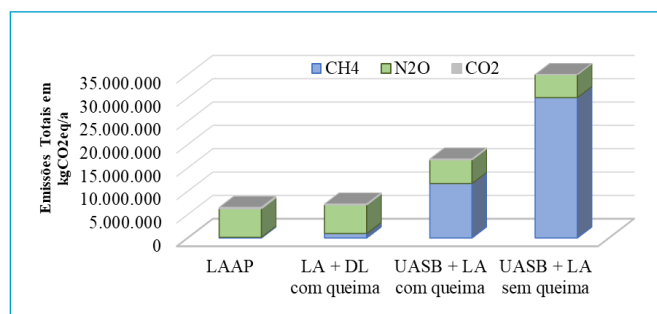


Figura 1 - Emissões de gases de efeito estufa por tipo de gás, calculadas no *Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring*.

Tabela 2 - Fatores de emissão adotados e calculados para os arranjos estudados.

Parâmetro [unidade]	LAAP	LA + DL c/ queima	UASB + LA c/ queima	UASB + LA s/ queima
FE_{CH_4} tratamento [kg _{CH₄} /kg _{DBO}]	0,018	0,018	0,222	0,574
FE_{N_2O} tratamento [kg _{N₂O+N} /kg _N]	0,016	0,016	0,013	0,013
FE_{CH_4} despejo [kg _{CH₄} /kg _{DBO}]	0,021	0,021	0,021	0,021
FE_{N_2O} despejo [kg _{N₂O+N} /kg _N]	0,005	0,005	0,005	0,005

lodo. No entanto, no arranjo UASB + LA, é importante considerar que a segunda etapa (LA) recebe carga orgânica já reduzida e produz uma quantidade específica de lodo menor do que LA de uma ETE de estágio único. Essa fração de lodo aeróbio é geralmente recirculada para o UASB (CHERNICHARO, 2007) e estabilizada juntamente com o lodo anaeróbio durante o tratamento do esgoto. Portanto, em combinações de processos de UASB e etapas aeróbias biológicas apenas a carga de DBO associada ao lodo excedente aeróbio deve ser considerada na Equação 1. Para determinar a quantidade de carga orgânica removida juntamente com o lodo, o IPCC (2019) recomenda o uso da Equação 2,

que também é aplicada pela ferramenta ECAM em conjunto com a Equação 1.

$$S = S_{ms} \cdot K_{rem} \quad (2)$$

Tabela 4 - Potenciais de aquecimento global dos gases relevantes no setor de saneamento.

Gás	GWP para com climate carbon feedback	
	AR5 (IPCC, 2013)	AR6 (IPCC, 2021)
CO ₂	1	1
CH ₄ fóssil	34,0	29,8
CH ₄ não fóssil		27,0
N ₂ O	298	273

Tabela 3 - Análise dos parâmetros gerais adotados pela ferramenta *Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring*.

Parâmetro [unidade]	Sugerido adotado	Análise/observações
Fator de emissão de energia elétrica consumida (FE _{CO₂}) [kg _{CO₂} /kWh]	0,296 0,0788	A ferramenta sugere valores provenientes do Banco Europeu de Investimos (EIB), mas permite customização pelo usuário. Sugere-se utilizar dados nacionais. Para o Brasil, sugere-se a utilização de 0,0788 kg _{CO₂} /kWh, conforme o Balanço Energético Nacional de 2021.
Consumo anual de proteína <i>per capita</i> [kg/(hab.a)]	32,12 32,12	A ferramenta sugere valores provenientes de cálculos com dados de estatística da FAO, mas que não são atualizados desde a última versão da ferramenta. Permite customização pelo usuário. Sugere-se a utilização do fornecimento de proteína específico mais atualizado da FAO (2023), multiplicando-o pela fração de proteína consumida de 0,92 conforme sugerido pelo IPCC (2019).
Carga de DBO ₅ <i>per capita</i> [g/(hab.d)]	50 50	A ferramenta sugere valores provenientes do IPCC, mas permite customização. Sugere-se a utilização de dados nacionais, regionais, ou da própria ETE, se disponíveis.
Proteína de origem industrial e comercial despejada na rede coletora [kg _N /kg _N]	1,25 1,25	A ferramenta sugere valores provenientes do IPCC, mas permite customização. Sugere-se a utilização de dados nacionais.
Proteína não consumida despejada juntamente ao esgoto sanitário [kg _N /kg _N]	1,10 1,00	A ferramenta sugere valores provenientes do IPCC, mas permite customização. Para o Brasil, sugere-se adotar 1,0 conforme IPCC (2019). Também é possível a utilização de dados adotados por instituições nacionais, se disponíveis.
Nitrogênio adicional, de produtos domésticos, despejado juntamente ao esgoto sanitário [kg _N /kg _N]	1,10 1,10	A ferramenta sugere valores provenientes do IPCC, mas permite customização. Sugere-se a utilização de dados adotados por instituições nacionais, se disponíveis.
Vazão <i>per capita</i> [L/(hab.d)]	200 200	A ferramenta define o valor de 200 L/hab.d. Na prática, não há prejuízo na impossibilidade de modificação. A vazão não é uma informação relevante porque o modelo de cálculo das emissões é realizado por meio de cargas. A carga, estimada pelo ECAM com base na vazão per capita, pode ser calculada externamente e preenchida pelo usuário.
Potencial de Aquecimento Global (GWP) do CH ₄ [kg _{CO₂eq} /kg _{CH₄}]	34 34	A ferramenta fornece a opção de selecionar o AR do IPCC a ser utilizado. Entretanto, não estão disponíveis para seleção AR posteriores à última versão implementada do ECAM, tampouco é possível customizar estes valores. Selecionou-se o AR5, mais recente disponível pelo ECAM (IPCC, 2013), com <i>climate-carbon-feedback</i> . O AR6 (IPCC, 2021) já fornece valores mais atualizados, sendo 27 para CH ₄ .
Potencial de Aquecimento Global do N ₂ O [kg _{CO₂eq} /kg _{N₂O}]	298 298	A ferramenta fornece a opção de selecionar o AR do IPCC a ser utilizado. Entretanto, não estão disponíveis para seleção AR posteriores à última versão implementada do ECAM, tampouco é possível customizar estes valores. Selecionou-se o AR5, mais recente disponível pelo ECAM (IPCC, 2013), com <i>climate-carbon-feedback</i> . O AR6 (IPCC, 2021) já fornece valores mais atualizados, sendo 273 para óxido nítrico

Obs: os GWP que consideram a condição de *climate carbon feedback* são aqueles que incluem o impacto do aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera no próprio ciclo do carbono.

Em que:

S: Carga de DBO removida como lodo a partir de uma etapa/sistema de tratamento de esgotos (kg_{DBO}/a).

S_{ms} : Massa seca de lodo removido de uma etapa/sistema de tratamento de esgotos (kg_{lodo}/a).

K_{rem} : Teor específico de carga orgânica do lodo (kg_{DBO}/kg_{lodo}).

O ECAM sugere que o cálculo da carga de DBO removida como lodo (S) seja realizado com base na massa seca de lodo removido (S_{ms}), utilizando-se uma produção específica em g/hab.dia, baseada na tabela apresentada por Andreoli *et al.* (2007). Para o teor específico de carga orgânica dos lodos (K_{rem}), o ECAM sugere os valores recomendados pelo IPCC (2019), que variam entre 0,5 e 1,16 kg_{DBO}_5/kg lodo seco. No entanto, esses valores podem levar a resultados de emissões negativas quando aplicados aos valores de Andreoli *et al.* (2007), conforme observado também por Andrews (2021). Portanto, sugere-se adotar um teor específico de carga orgânica (K_{rem}) entre 0,57 e 0,80 kg_{DBO}/kg_{SST} , conforme apresentado na **Tabela 5**.

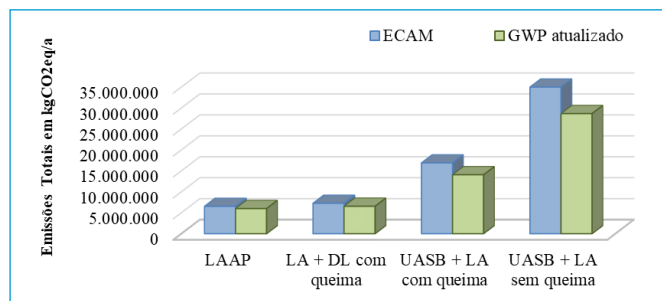


Figura 2 - Comparação entre as emissões: *Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring (AR5)* e planilha externa (AR6).

A **Tabela 6** fornece os valores específicos de acordo com o tipo de tratamento.

3.5. Limitações relacionadas ao cálculo do fator de emissão de metano

A ferramenta ECAM sugere FE de CH_4 com base no IPCC (2019). No entanto, é importante considerar algumas ponderações sobre a equação que gerou o FE calculado pelo IPCC. Esse fator é obtido multiplicando-se a capacidade

Tabela 6 - Produção de lodo de acordo com o processo de tratamento.

Processo	Produção de lodo [$kg_{st}/hab.dia$] Andreoli et al. (2007)		Produção de lodo adotada* [$kg_{st}/hab.dia$]	K_{rem}^{**} [kg_{DBO}/kg_{lodo}]
	Primário	Secundário		
Lodos ativados	Primário	35 - 45	65	0,57
	Secundário	25 - 35		
	Total	60 - 80		
Filtro biológico percolador	Primário	35 - 45	65	0,57
	Secundário	20 - 30		
	Total	55 - 75		
UASB + lodos ativados	Anaeróbio	12 - 18	10	0,80
	Secundário	8 - 14		
	Total	20 - 32		
UASB + filtro biológico percolador	Anaeróbio	12 - 18	10	0,80
	Secundário	ND		
	Total	ND		
UASB + Sistema de lagoas	Anaeróbio	12 - 18	10	0,80
	Secundário	ND		
	Total	ND		

*Quantidade de lodo a ser retirada para consideração do alívio de carga de fase aeróbia.

**Determinado de acordo com as suposições anteriormente apresentadas.

Tabela 5 - Suposições para determinação do teor específico de carga orgânica do lodo (K_{rem}) para processos de lodos ativados e filtros biológicos percoladores.

Parâmetro [unidade]	Valor	Fonte
Produção específica de lodos [$g/(hab.d)$]	60	von Sperling (2007)
Carga específica de DBO [$g/(hab.d)$]	50	von Sperling (2007)
Eficiência de remoção de sólidos da decantação primária (1h) [%]	50	DWA (2016)
Eficiência de remoção de DBO da decantação primária (1h) [%]	25	ATV-DVWK (2000)*
Teor específico de DBO do lodo da decantação primária [kg_{DBO}/kg_{st}]	0,42	Cálculo próprio
Teor específico de DBO do lodo da decantação secundária [kg_{DBO}/kg_{ss}]	0,80	ATV-DVWK (2000)*/**
Proporção de sólidos descarregados decantação primária/ secundária [-]	60:40	Andreoli <i>et al.</i> (2007)

*Foi necessário utilizar a versão anterior (ATV-DVWK, 2000) para o dimensionamento de sistemas de lodos ativados de uma etapa, já que a nova edição (DWA, 2016) aborda apenas informações relacionadas ao DQO.

**Derivado de que 1 mg/L de SS da decantação secundária corresponde a DBO de 0,3 a 1,0 mg/L.

máxima de produção de metano ($b_{CH_4,0}$) pelo fator de correção (MCF) (Equação 3), que representa a fração tratada anaerobiamente.

$$FE_{CH_4,j} = b_{CH_4,0} \cdot MCF_j \quad (3)$$

Em que:

FE_{CH_4} : Fator de emissão de metano (kg_{CH_4}/kg_{DBO}).

$b_{CH_4,0}$: Capacidade máxima de produção de metano (kg_{CH_4}/kg_{DBO}).

MCF_j : Fator de correção de metano (-).

O IPCC (2019) adota capacidade máxima de produção de metano ($b_{CH_4,0}$) de $0,25 kg_{CH_4}/kg_{DQO}$ e $0,60 kg_{CH_4}/kg_{DBO}$. A produção máxima de CH_4 de $0,25 kg_{CH_4}/kg_{DQO}$ é baseada na estequiometria da biodegradação da matéria orgânica, enquanto a produção máxima de CH_4 relacionada à DBO é assumida com base na relação DQO:DBO de 2,4. No entanto, para o Brasil, a relação DQO:DBO de 2,0 é usualmente adotada (VON SPERLING, 2007), resultando na produção máxima de CH_4 de $0,50 kg_{CH_4}/kg_{DBO}$.

Os MCFs são aplicados às cargas afluentes e aos arranjos de tratamento compostos. É necessário considerar a carga afluente e a eficiência do primeiro processo para calcular as emissões do segundo processo, levando-se em conta a carga orgânica convertida em CH_4 . O IPCC (2019) fornece FE padrão de CH_4 de $0,20 kg_{CH_4}/kg_{DQO_{afluente}}$ para UASB. No entanto, é importante avaliar criticamente esse fator, pois ele não considera a redução da carga orgânica convertida em CH_4 pela produção de lodo e a redução competitiva de sulfato.

Weiland *et al.* (2007) sugeriram que 10% do resultado da avaliação estequiométrica deve ser descontado devido à produção de lodo. Com a produção específica de lodo variando entre 0,11 e $0,23 kg_{DQO_{lodo}}/kg_{DQO}$ (CHERNICHARO, 2007), e eficiências de remoção de demanda química de oxigênio (DQO) entre 65 e 70%, espera-se que essa parcela seja de aproximadamente 17 a 33%. Souza (2010) também observou relação de 18 a 30% entre DQO convertida em lodo e DQO afluente, além de parcela adicional de 5% de DQO consumida durante a

redução de sulfato. Considerando-se esses fatores, Souza *et al.* (2012) determinaram uma produção de CH_4 de $0,195 kg_{CH_4}/kg_{DQO_{eliminado}}$ ou $0,122 kg_{CH_4}/kg_{DQO_{afluente}}$, considerando a redução da carga orgânica convertida em CH_4 pela produção de lodo e a redução competitiva de sulfato.

Apesar das recomendações do IPCC de utilizar fatores nacionais, as contribuições de Chernicharo (2007), Souza (2010) e Souza *et al.* (2012) não têm sido consideradas pelo Setor de Saneamento. Com base nessas experiências, sugere-se uma produção de CH_4 de $0,195 kg_{CH_4}/kg_{DQO_{eliminado}}$ para calcular as emissões, equivalente a $0,127 kg_{CH_4}/kg_{DQO_{afluente}}$ e $0,254 kg_{CH_4}/kg_{DBO_{afluente}}$, para uma eficiência de 65% de remoção de DQO.

Para avaliar corretamente as emissões em UASB com coleta e queima de biogás, é necessário considerar as perdas inerentes ao processo e as perdas no sistema a jusante dos reatores. As inerentes podem ser obtidas comparando-se a produção de CH_4 , conforme Souza *et al.* (2012), com a conversão de CH_4 de Lobato (2011). Em cenário neutro, com conversão de CH_4 de $10,20 NL_{CH_4}/(hab.d)$ ou $0,113 kg_{CH_4}/kg_{DQO_{eliminado}}$, as perdas inerentes ao processo nos reatores UASB são estimadas em 42%. Deduzindo-se as perdas no sistema de biogás a jusante dos reatores UASB de 5%, ocorre emissão de $0,087 kg_{CH_4}/kg_{DQO_{eliminado}}$. Com remoção de DQO de 65% e relação DQO:DBO de 2, a emissão é de $0,114 kg_{CH_4}/kg_{DBO_{afluente}}$, mesmo considerando-se a coleta e queima do biogás.

A **Figura 3** apresenta as emissões calculadas com os FEs sugeridos, em comparação aos disponíveis no ECAM, conforme IPCC (2019), ambos considerando o GWP do AR5. Ao utilizar os FEs derivados de pesquisas nacionais, as emissões para o arranjo UASB + LA sem a queima de

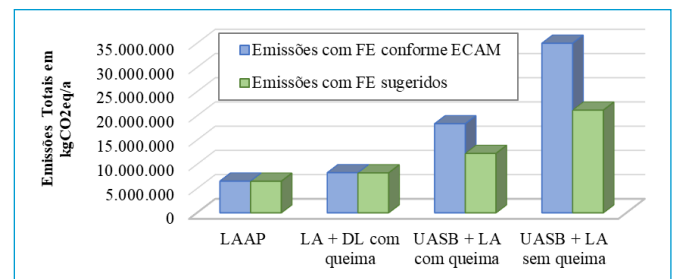


Figura 3 – Comparação entre emissões de gases de efeito estufa com fatores de emissão sugerido pelo *Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring* e pelos autores.

biogás são 40% menores, e, considerando-se a queima do biogás coletado, são 33% menores.

4. CONCLUSÃO

A ferramenta ECAM foi avaliada pela sua aplicação na estimativa de emissões de GEE de quatro arranjos típicos de ETEs no Brasil, demonstrando seu potencial para cálculos e análise de resultados. Evidenciou-se como menor emissor o arranjo de lodos ativados com aeração prolongada, decorrente do baixo fator de emissão de energia elétrica no Brasil, onde há predominância de hidrelétricas na matriz energética. No entanto, a eficiência energética se torna crucial devido à escassez hídrica futura, tornando as tecnologias anaeróbias promissoras.

Comparados ao lodo ativado com aeração prolongada, o processo de lodo ativado com digestão anaeróbia e a combinação de reator UASB com lodo ativado apresentaram redução no consumo de energia elétrica entre 36 e 43%, podendo chegar a 81 e 90% com o aproveitamento do biogás. Além de aliviar a demanda limitada por eletricidade, isso resulta em custos mais baixos de tratamento de esgoto, promovendo melhor relação custo-eficácia e contribuindo para a universalização do tratamento de esgoto. Já a diferença entre o processo de lodo ativado com digestor de lodo e a combinação de reator UASB com lodo ativado

está principalmente na quantidade de biogás perdido no UASB. A comparação com um cenário em que o biogás captado no reator UASB não é coletado nem queimado resulta em aumento de 110% de emissões, destacando a importância da coleta e queima adequadas do biogás.

É importante observar que a ferramenta ECAM permite análise aprofundada dos resultados, fornecendo dados categorizados por tipo de GEE e categoria de emissão. No entanto, é necessário atentar para a seleção dos FEs, que são responsabilidade do usuário e impactam todos os cálculos. Embora o ECAM sugira os fatores do IPCC, algumas de suas fragilidades são discutidas no artigo, e é possível modificá-los, se desejável.

Uma das principais vantagens do uso do ECAM é a padronização dos cálculos realizados pelas empresas de saneamento no Brasil. Isso evita a utilização de fontes diversas e torna as emissões comparáveis. No entanto, uma limitação da ferramenta é a falta de flexibilidade para alterar manualmente os valores de GWP utilizados nos cálculos, impedindo o uso dos relatórios mais recentes do IPCC. No Setor de Saneamento, a usabilidade de uma ferramenta específica para cálculos de emissões é de grande importância, pois contribui para que aspectos relacionados à mitigação de GEE sejam integrados às estratégias institucionais.

REFERÊNCIAS

AHN, J.H.; KIM, S.; PARK, H.; RAHM, B.; PAGILLA, K.; CHANDRAN, K. N₂O Emissions from Activated Sludge Processes, 2008–2009: results of a national monitoring survey in the United States. *Environmental Science & Technology*, v. 44, n. 12, p. 4505-4511, 2010. <https://doi.org/10.1021/es903845y>

ANDREOLI, C.V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Eds.). *Sludge Treatment and Disposal*. [S.L.]: Iwa Publishing, 2007, 241 p. (Biological Wastewater Treatment Series). <https://doi.org/10.2166/9781780402130>

ANDREWS, J. *Carbon accounting guidelines for wastewater treatment: CH₄ and N₂O*. Water New Zealand, 2021, 73 p. (Water New Zealand Standard Methods). Disponível em: https://www.waternz.org.nz/Attachment?Action=Download&Attachment_id=4872. Acesso em: 12 abr. 2023.

ATV-DVWK (ABWASSER, ABFALL UND GEWÄSSERSCHUTZ - DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E.V.) *ARBEITSBLATT ATV-DVWK A 131: Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen*. Hennef: Gesellschaft Zur Förderung der Abwassertechnik E.V., 2000, 57 p.

CHERNICHARO, C.A.L. *Anaerobic Reactors*. 2. ed. [S.L.]: IWA Publishing, 2007, 184 p. (Biological Wastewater Treatment Series). <https://doi.org/10.2166/9781780402116>

DAELMAN, M.R.J.; VAN VOORTHUIZEN, E.M.; VAN DONGEN, L.G.J.M.; VOLCKE, E.I.P.; VAN LOOSDRECHT, M.C.M. Methane and nitrous oxide emissions from municipal wastewater treatment - results from a long-term study. *Water Science and Technology*, v. 67, n. 10, p. 2350-2355, 2013. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.109>

- DWA. Arbeitsblatt DWA-A 131: Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 2016.
- FAO. *FAOSTAT Statistical Database*. 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/>. Acesso em: 12 abr. 2023.
- FOLEY, J. N₂O and CH₄ Emission from Wastewater Collection and Treatment Systems: state of the science report and technical report. *Water Intelligence Online*, v. 14, p. 1-248, 2015. <https://doi.org/10.2166/9781780407340>
- IPCC. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. In: EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (Eds.). Japan: IGES, 2006.
- IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.; TIGNOR, M.S.; ALLEN, K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V. and MIDGLEY, P.M. (Eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013, 1535 p.
- IPCC. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. In: CALVO BUENDIA, E.; TANABE, K.; KRANJC, A.; BAASANSUREN, J.; FUKUDA, M.; NGARIZE, S.; OSAKO, A.; PYROZHENKO, Y.; SHERMANAU, P.; FEDERICI, S. (Eds.). Switzerland: IPCC, 2019.
- IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S.L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M.I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J.B.R.; MAYCOCK, T.K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇI, O.; Yu, R.; ZHOU, B. (Eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2021, 2391 p.
- KAMPSCHREUR, M.J.; TEMMINK, H.; KLEEREBEZEM, R.; JETTEN, M.S.M.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M. Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Research*, v. 43, n. 17, p. 4093-4103, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.001>
- LOBATO, L.C.S. *Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico*. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- MELLO, W.Z.; RIBEIRO, R.P.; BROTTTO, A.C.; KLIGERMAN, D.C.; PICCOLI, A.S.; OLIVEIRA, J.L.M. Nitrous oxide emissions from an intermittent aeration activated sludge system of an urban wastewater treatment plant. *Química Nova*, v. 36, n. 1, p. 16-20, 2013. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422013000100004>
- ROTHAUSEN, S.G.S.A.; CONWAY, D. Greenhouse-gas emissions from energy use in the water sector. *Nature Climate Change*, v. 1, n. 4, p. 210-219, 2011. <https://doi.org/10.1038/nclimate1147>
- SILVA, B.E.; CABRAL, C.; ROSENFELDT, S.; KERRES, M.; VEIZAGA, A.; MOSKOPP, D. *ECAM User Manual*. 2022. Disponível em: https://climatesmartwater.org/wp-content/uploads/sites/2/2022/11/UserManual_FinalVersion-1.pdf. Acesso em: 12 abr. 2023.
- SOUZA, C.L. *Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgoto doméstico em reatores UASB*. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- SOUZA, C.L.; CHERNICHARO, C.A.L.; MELO, G.C.B. Methane and hydrogen sulfide emissions in UASB reactors treating domestic wastewater. *Water Science and Technology*, v. 65, n. 7, p. 1229-1237, 2012. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.854>
- VON SPERLING, M. *Anaerobic Reactors*. 2. ed. [S.L.]: IWA Publishing, 2007, 292 p. (Biological Wastewater Treatment Series). <https://doi.org/10.2166/9781780402086>
- WEILAND, P.; KLINGEBIEL, L.; TEBBE, C.C.; DOHRMANN, A-B; BAUMERT, S. *Untersuchungen zum qualitativen und quantitativen Vorkommen von Clostridium botulinum in Substraten und Gärrückständen von Biogasanlagen*. Braunschweig: Bundesforschungsanstalt Für Landwirtschaft (FAL), 2007, 109 p. Disponível em: https://www.ml.niedersachsen.de/download/50080/Untersuchungen_zum_qualitativen_und_quantitativen_Vorkommen_von_Clostridium_Botulinum_in_Substraten_und_Gaerrueckstaenden_von_Biogasanlagen_FAL_2007_nicht_vollstaendig_barrierefrei.pdf. Acesso em: 12 abr. 2023.