

Geração de crédito de carbono a partir de resíduos sólidos em Sergipe

Carbon credit generation from solid waste in Sergipe

Mathias de Jesus Almeida¹, Taísa Andrade Barbosa², Luciana Coêlho Mendonça³

RESUMO

O rápido crescimento populacional e a intensificação da industrialização são fatores responsáveis pelo consumo de novos produtos e aumento da geração de resíduos sólidos que, se não dispostos corretamente, podem intensificar problemas ambientais. Assim, o presente estudo objetivou estimar a geração de créditos de carbono por meio da disposição dos resíduos gerados no aterro sanitário do estado de Sergipe, considerando o aproveitamento energético ou simples queima do biogás. Para isso, utilizou-se a metodologia disposta pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) para estimar a quantidade de metano (CH₄) gerada de acordo com a quantidade de resíduo depositada no aterro. Como resultado, concluiu-se que a geração de crédito de carbono é maior para a simples queima do biogás em comparação com o aproveitamento energético. Ademais, os dois sistemas apresentam grandes benefícios ambientais, a exemplo da mitigação do efeito estufa, prejudicial à vida no planeta.

Palavras-chave: Gases do Efeito Estufa. Metano. Mudanças climáticas. Aterro Sanitário. Aproveitamento Energético.

ABSTRACT

The rapid population growth and the intensification of industrialization are factors responsible for the consumption of new products and generation of solid waste which, if not disposed of correctly, can intensify environmental problems. Thus, the present work aimed to estimate the generation of carbon credits through the disposal of waste in a sanitary landfill in the state of Sergipe, considering its energy use or simple burning of biogas. For this, the methodology provided by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) was used to estimate the amount of methane (CH₄) generated according to the amount of waste deposited in the landfill. As a result, it was concluded that the generation of carbon credit is higher for the simple burning of biogas compared to energy use. In addition, both systems have great environmental benefits, such as the mitigation of the greenhouse effect, which is harmful to life on the planet.

Keywords: Greenhouse Gases. Methane. Climate Change. Sanitary Landfill. Energy Recovery.

¹ Bacharel em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Sergipe.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5280-3747>

E-mail: mtjsal.1998@gmail.com

² Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Sergipe.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2159-6101>

E-mail: taisacivil@gmail.com

³ Doutorado em Engenharia Civil - Hidráulica e Saneamento. Universidade Federal de Sergipe.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6979-8135>

E-mail: lumendon@academico.ufs.br

1. INTRODUÇÃO

O ser humano, visando suprir suas necessidades e desejos, utiliza toda forma de recursos disponíveis na natureza para desenvolver novos produtos, transformando dessa maneira o ambiente em que vive. Entretanto esta intervenção humana, quando realizada de forma descontrolada, torna-se origem de problemas para o mesmo ambiente em que o Homem está inserido (SILVA; MACEDO, 2012).

Fatores como o rápido crescimento populacional, urbanização e industrialização, interferem de forma significativa no consumo de novos produtos e, por consequência, na geração de resíduos sólidos, provenientes de áreas residenciais, públicas e industriais (SAJJAD et al., [s.d.]).

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2020), na última década, a quantidade de resíduos sólidos coletados cresceu cerca de 23,2%, passando de 59 milhões para 72,7 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos coletados em todo território brasileiro. Ainda de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2021), a massa média per capita de resíduos sólidos coletados em relação à população urbana e rural brasileira é de 0,97 kg/hab./dia.

Em relação à disposição desses resíduos, a ABRELPE (2020) afirma que 59,5% dos resíduos sólidos urbanos são destinados a aterros sanitários, por outro lado, 40,5% dos resíduos coletados ainda são dispostos em unidades inadequadas, tais como lixão e aterro controlado. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), aprovada em 2010, trata dos princípios e objetivos da gestão integrada e gerenciamento de resíduos sólidos e considera a disposição final em aterros sanitários ambientalmente correta, tendo em vista que esta evita danos à saúde pública e à segurança populacional, além de minimizar os impactos causados ao meio ambiente (BRASIL, 2010).

Ademais, os aterros sanitários apresentam grande potencial na geração de gases como o metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂), devido à decomposição anaeróbia da grande quantidade de matéria orgânica presente nos resíduos sólidos, mais precisamente 45,3%, segundo a estimativa realizada pela ABRELPE (2020), sendo considerado, assim, uma fonte de geração de energia limpa. Entretanto, quando esses gases são emitidos na atmosfera, tornam-se responsáveis pela intensificação do efeito estufa.

Dessa forma, visando a redução da emissão dos gases poluentes, a gestão de resíduos sólidos tem sido objeto de estudo ao redor do mundo. Tal fato pode ser observado

com a assinatura do acordo ambiental, chamado de Protocolo de Quioto, durante a 3ª Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, realizada no Japão em 1997. Este foi o primeiro tratado internacional para controle da emissão de gases de efeito estufa, além do estímulo à criação de formas de desenvolvimento sustentável, visando a preservação do meio ambiente (BRASIL, 2022).

Para atingir as metas e objetivos do acordo, foram estabelecidos mecanismos de flexibilidade, dentre os quais vale destacar o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), composto por projetos com grande potencial de sequestrar os gases causadores do efeito estufa ou reduzir a sua emissão. A operacionalidade do MDL se baseia na emissão autorizada de Certificado de Redução de Emissões (CRE) ou simplesmente “Créditos de Carbono”, sendo que cada crédito de carbono equivale a uma tonelada métrica de CO₂ (ou equivalente) que deixou de ser emitida para a atmosfera (GODECKE, 2010).

Outro mecanismo importante é o Mercado de Créditos de Carbono, que consiste na compra de créditos de carbono por países que não conseguirem atingir suas metas de redução de gases do efeito estufa daqueles que reduziram as suas emissões, promovendo a cooperação entre os países e o alcance das metas de redução estabelecidas (CARDINALLI, 2022). Desta maneira, vários países emergentes, a exemplo do Brasil, apesar de não terem obrigações de reduzir as emissões de gases do efeito estufa, aderem às práticas do MDL, visando a obtenção de recursos e investimentos, além de contribuir de forma direta para o desenvolvimento sustentável e para o enfrentamento das mudanças climáticas (BEZERRA, 2012; OLIVEIRA, 2022).

Diante disso, levando em conta o potencial dos resíduos sólidos na geração de gases de efeito estufa por meio da decomposição da sua parcela biodegradável e a oportunidade de transformar tal problema ambiental e social em recursos financeiros, este estudo objetiva estimar a geração de créditos de carbono, por meio da correta disposição dos resíduos sólidos que são gerados no estado de Sergipe.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Estimativa de geração de biogás

Este projeto foi desenvolvido por meio da aplicação do modelo de decaimento de primeira ordem, proposto pelas diretrizes do Painel Intergovernamental para a Mudança de Clima (IPCC, 2000). Tal método consiste na estimativa de emissões de metano em aterros sanitários de acordo com a quantidade de resíduo depositada.

A estimativa foi realizada para as condições existentes no único aterro sanitário do estado de Sergipe, localizado no município de Rosário do Catete, distante 37 km da capital Aracaju. As informações mostradas na Tabela 1, referentes à unidade administrada pela empresa ESTRE, foram coletadas por meio de formulário eletrônico enviado ao supervisor de operação do aterro sanitário.

Tabela 1. Dados do aterro sanitário de Rosário do Catete

Área do aterro (ha)	103
Início de operação do aterro (ano)	2.013
Fim da vida útil (ano)	2.040
Média mensal de entrada de resíduos sólidos no aterro (t)	45.000

Fonte: ESTRE (2022)

A metodologia descrita a seguir foi aplicada para dois cenários. O primeiro, denominado de cenário atual, considera a quantidade de resíduos sólidos urbanos que atualmente recebe uma destinação ambientalmente correta, ou seja, quantidade de resíduos que chegam ao aterro, considerando a média disponibilizada pela empresa ESTRE. O segundo, chamado de cenário ideal, apresenta valores que levam em conta uma suposta disposição em aterro sanitário de todo o resíduo sólido urbano gerado no estado, sendo 2021 o ano de referência para ambos os cenários.

Salienta-se que o número populacional do estado de Sergipe adotado para a aplicação da metodologia foi o estimado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o ano de 2021, correspondente a 2.338.474 habitantes e a massa média *per capita* de resíduos sólidos coletados em relação à população total, foi a disponibilizada pelo (SNIS, 2021) equivalente a 1,13 kg/hab.dia para a região Nordeste.

O modelo de decaimento de primeira ordem analisa a variação anual das emissões de CH₄, tendo como base os parâmetros de constante de decaimento (k) e potencial de geração de metano (L₀). O primeiro está diretamente relacionado com o tempo de geração de metano a partir da deposição dos resíduos, podendo ser afetado pelo teor de umidade do aterro, temperatura ou potencial de oxidação e o segundo representa a quantidade de metano produzida pela massa de resíduo, sendo sensível a alterações na gravimetria e apresenta valor máximo quando os resíduos são confinados em condição anaeróbia (SANTOS; ROMANEL; ELK, 2017).

O método descrito pelo IPCC (2000) é expresso pela Equação 1:

$$Q_{CH4emitido} = (Q_{CH4gerado} - R) (1 - OX) \quad (1)$$

Em que:

$Q_{CH4emitido}$: CH₄ emitido no ano de referência (t/ano);

$Q_{CH4gerado}$: CH₄ gerado no ano de referência (t/ano);

R: metano recuperado no ano de referência (t/ano);

OX: fator de oxidação.

O metano recuperado (R) corresponde a parcela do CH₄ que é queimada em um queimador ou dispositivo de recuperação de energia e o fator de oxidação (OX) reflete a quantidade de gás que é oxidado no solo ou em outro material que cobre os resíduos. Em razão do desconhecimento destes dados referentes ao aterro analisado, foram utilizados os valores padrões fornecidos pelo IPCC (2000) e (IPCC, 2006a) sendo igual a 0 para os dois parâmetros.

Dessa forma a quantidade de CH₄ emitido ($Q_{CH4emitido}$) será igual à quantidade de CH₄ gerado ($Q_{CH4gerado}$) e este pode ser estimado por meio da Equação 2.

$$Q_{CH4gerado} = A k R S L_0 e^{-k(T_1 - T_0)} \quad (1)$$

Em que:

A: $(1 - e^{-k})/k$, fator de normalização;

k: constante da taxa de geração de metano;

RS: quantidade de resíduo sólido disposto no aterro no ano T_1 (t/ano);

T_0 : ano de início do funcionamento do aterro;

T_1 : ano de referência;

L_0 : potencial de geração de metano (t_{CH4}/t_{RSU}).

O potencial de geração de metano (L_0) é definido pela Equação 3:

$$L_0 = FCM COD COD_f F 16/12 \quad (2)$$

Em que:

FCM: fator de correção do metano;

COD: carbono orgânico degradável (t_c/t_{RSU});

COD_f : fração de COD que pode se decompor;

F: fração de metano presente no biogás;

16/12: taxa de conversão de carbono para metano (t_{CH4}/t_c).

O valor da constante de decaimento (k) está relacionado ao tempo necessário para o carbono orgânico presente nos resíduos decair para metade de sua massa inicial e sua determinação depende de alguns fatores associados à composição dos resíduos e às condições do aterro, a exemplo da umidade e temperatura. Em caso de inexistência de dados ou desconhecimento sobre as características do resíduo necessárias à determinação do k , um valor de 0,05 é sugerido como valor padrão, considerando uma meia-vida de cerca de 14 anos (IPCC, 2006b).

O fator de correção do metano (FCM) depende do controle, da disposição e da gestão dada aos resíduos sólidos, visto que os resíduos despejados em ambientes não gerenciados ou em aterros com camadas de baixa profundidade, produzem menos CH_4 devido à decomposição aeróbia na camada superior dos resíduos depositados (IPCC, 2006b). No aterro analisado neste estudo, o gerenciamento é realizado de forma que a decomposição dos resíduos ocorra de maneira anaeróbia, sendo assim o valor recomendado corresponde a 1. A fração de metano presente no biogás depende da composição do resíduo que, em sua maioria, gera aproximadamente 50% de CH_4 . Dessa forma o valor recomendado para a fração de metano presente no biogás proveniente de aterro é de 0,5 (IPCC, 2000, 2006a).

Em relação ao carbono degradável que se decompõe (COD_t), o (IPCC, 2006a) recomenda a utilização de 0,5 para a fração de carbono que é degradada e liberada no local de disposição dos resíduos sólidos, sendo o restante armazenado no aterro como matéria orgânica estável ou degradado por meio de outros processos (SCARLAT et al., 2015).

Para a determinação do carbono orgânico degradável (COD), calcula-se a média ponderada do teor de carbono de vários componentes presentes nos resíduos por meio da Equação 4.

$$COD = \sum COD_i W_i \quad (3)$$

Em que:

COD_i : fração de carbono degradável no resíduo tipo i ;

W_i : fração de resíduo tipo i na composição gravimétrica.

Os valores de carbono orgânico degradável para cada tipo de resíduo disponibilizados pelo (IPCC, 2006a) estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Valores padrão para carbono orgânico degradável

Componente	Teor de COD _i
Papel/papelão	0,40
Matéria orgânica	0,15
Têxteis	0,24
Madeira	0,43
Borracha/couro	0,39
Fraldas	0,24
Jardim e parque	0,20

Fonte: IPCC (2006a)

Em razão do desconhecimento da gravimetria de resíduos do aterro em questão, adotou-se como referência a média da composição gravimétrica dos resíduos sólidos coletados em alguns bairros e/ou municípios do Estado, tais como os bairros 18 do Forte, 13 de Julho, Bugio, Centro, Jardins e Luzia, localizados em Aracaju, e nos municípios de Nossa Senhora do Socorro, Barra dos Coqueiros, Telha, Cedro de São João, Propriá, Porto da Folha e Pirambu.

Tabela 3. Gravimetria de resíduos

Material	(%)
Papel/papelão	12,54
Matéria orgânica	45,29
Têxteis	2,31
Madeira	0,44
Borracha/couro	1,37
Fraldas descartáveis	2,12
Jardim e Parque	0,51
Outros	35,42

2.2 Geração de crédito de carbono por meio do aproveitamento energético do biogás

A geração de eletricidade é feita por meio da combustão do biogás em máquinas térmicas para acionamento de geradores, responsáveis pela conversão da energia mecânica em energia elétrica. A equação que calcula o potencial energético do biogás

relaciona a vazão de CH₄, o poder calorífico do metano e o tempo de disponibilidade correspondente a 1 ano (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2006 apud Montagner, 2021).

$$P_d = V P_c E_c T^{-1} \quad (4)$$

Em que:

P_d: potência disponível por ano ($W = J/s$);

V: vazão de CH₄ gerado no ano ($m^3_{CH_4}/ano$);

P_c: poder calorífico do metano ($35,53 \times 10^6 J/m^3_{CH_4}$);

E_c: eficiência do sistema de coleta de gases do aterro (%);

T: período de vazão ($31,536 \times 10^6 s/ano$);

Para a aplicação da Equação 5, inicialmente fez-se necessário a conversão da vazão de CH₄ gerada no aterro sanitário para metro cúbico. Para isso, dividiu-se a quantidade de CH₄ pela densidade do metano equivalente a 0,0007168 t/m³ (TOMAZI, 2013).

A eficiência adotada para o sistema de coleta do biogás foi igual a 70%, valor médio de eficiência percentual do sistema de captura, segundo (FASSONI-ANDRADE; MEDEIROS; LISBOA, 2016). Para o desenvolvimento deste estudo, foi considerado um motor de combustão interna (ciclo OTTO) com eficiência total de conversão de 28%. Sua escolha se justifica pelo melhor rendimento energético e econômico em comparação com outras tecnologias empregadas na combustão, a exemplo da microturbina a gás (SANTOS; BARROS; TIAGO FILHO, 2015).

Tendo a potência disponível por ano (P_d) e a eficiência, em porcentagem, do motor de combustão interna (E_{mci}), calculou-se a potência gerada por meio da multiplicação desses dois parâmetros, conforme mostrado na Equação 6.

$$P_g = P_d E_{mci} \quad (5)$$

Em que:

P_g: potência gerada por ano (W).

Por fim, determinou-se a energia disponível por ano, multiplicando a potência gerada com o tempo de produção ou de consumo em horas, visto que a conversão da potência gerada em energia elétrica é realizada considerando a liberação de uma determinada potência ao longo de um dado período e, levando em conta as paradas do sistema para

manutenção de equipamentos e outros imprevistos inerentes ao funcionamento do sistema, foi adotada uma redução de 10% na energia final (MONTAGNER, 2021).

Assim a quantidade de energia relativa a uma determinada potência pode ser expressa pela Equação 7.

$$E = 0,9 P_g T_{ano} \quad (6)$$

Em que:

E: quantidade de energia (Wh/ano);

T_{ano}: número total de horas em um ano (8760h).

Vale ressaltar que a unidade de medida de energia pode ser expressa tanto em Wh (Watt-hora), quanto em suas variações KWh (kilowatt-hora) e MWh (megawatt-hora), correspondente a 10³ Wh e 10⁶ Wh, respectivamente.

Com a quantidade de energia calculada por meio do aproveitamento energético do biogás, determinou-se a estimativa de geração de Crédito de Carbono (CC), multiplicando a energia produzida e o Fator de Emissão Médio (FEM) de CO₂, inferindo assim o total de emissões de dióxido de carbono que seriam evitadas com esse aproveitamento.

Tal fator é calculado através de metodologia aprovada pelo conselho executivo do MDL (OLIVEIRA, 2022). O FEM é disponibilizado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações e para o ano 2021 seu valor médio foi igual a 0,5985 tCO₂/MWh (BRASIL, 2021).

2.3 Geração de crédito de carbono por meio da queima do biogás

A estimativa de geração de crédito de carbono por meio da queima do biogás foi realizada supondo a utilização de queimadores tipo *flare*, com eficiência de 50%. Os queimadores *flare* são responsáveis pela conversão de grande parte do biogás em dióxido de carbono, reduzindo conseqüentemente as emissões do CH₄. A eficiência do sistema de coleta de biogás foi a mesma citada no item 2.2.

Dessa forma, a quantidade de crédito de carbono gerada, por meio da captura e queima do biogás proveniente do aterro sanitário, representa a massa total de dióxido de carbono que deixou de ser emitido na atmosfera e pode ser definida pela Equação 8.

$$CC = C_{eq} Q_{CH4gerado} \quad (7)$$

Em que:

CC: crédito de carbono gerado (tCO₂/ano);

C_{eq} : dióxido de carbono equivalente do metano = 21 (CO_2/CH_4);

0,35: multiplicação das eficiências do queimador e do sistema de coleta de biogás (0,5 x 0,7).

2.4 Retorno financeiro

O retorno financeiro com a comercialização dos CREs é estimado multiplicando a quantidade total de crédito gerado pelo valor da tonelada de dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}) na cotação de mercado para o ano recorrente, conforme a Equação 9.

$$V_{cc} = CC \times P_{cc} \quad (8)$$

Em que:

V_{cc} : Valor total da venda dos créditos de carbono (R\$);

P_{cc} : Preço de um crédito de carbono (R\$).

3. RESULTADOS

3.1 Geração de metano (CH_4)

Os resultados apresentados abaixo correspondem aos dois cenários abordados na metodologia, o cenário atual que considera a quantidade de resíduo que realmente foi depositada no aterro e o cenário ideal, representando a capacidade potencial de geração de CH_4 se todo o resíduo sólido gerado no estado de Sergipe em 2021 tivesse como destino final o aterro sanitário de Rosário do Catete.

Tabela 5. Geração de metano

Cenário	Atual	Ideal
Quantidade de resíduo gerada em 2021 (t)	964.504	964.504
Quantidade de resíduo destinada ao aterro em 2021 (t)	540.000	964.504
Carbono orgânico degradável - COD (tc/trsu)	0,137	0,137
Potencial de geração de metano - L_0 ($t_{CH_4}/trsu$)	0,046	0,046
CH_4 gerado (t/ano)	812,07	1.450,45

3.2 Estimativa de geração de crédito de carbono por meio do aproveitamento energético

Os valores apresentados na Tabela 6, referentes ao aproveitamento energético do biogás e à estimativa da geração de CC por meio deste, foram determinados seguindo o item 2.2 da metodologia, considerando a adoção de um motor de combustão interna com

eficiência de 28% para ambos os cenários adotados. Em seguida, foi calculada a quantidade de CO_{2eq} que deixou de ser emitida na atmosfera, resultado da multiplicação entre a quantidade de energia gerada e o FEM para o ano de 2021, segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações.

Tabela 6. Aproveitamento energético e geração de CC

Cenário	Atual	Ideal
Vazão de CH ₄ gerado no ano - V (m ³ CH ₄ /ano)	1.132.910,16	2.023.507,25
Potência disponível por ano - P _d (kW)	893,47	1.595,85
Potência gerada por ano - P _g (kW)	250,17	446,84
Quantidade de energia anual - E (MWh/ano)	1.972,34	3.522,89
Fator de Emissão Médio - FEM (tCO ₂ /MWh)	0,5985	0,5985
Emissão de CO ₂ evitada (tCO ₂ /ano)	1.180,45	2.108,45

Vale ressaltar que cada tonelada de CO_{2eq} que deixou de ser emitida com o aproveitamento do biogás, corresponde a um crédito de carbono ou CRE. Em relação ao aproveitamento energético do biogás, o aterro analisado está em processo de captação de recursos para implantação do sistema de geração de energia, com previsão para instalação da usina até o final de 2022.

3.3 Estimativa de geração de crédito de carbono por meio de queimadores

A quantificação dos créditos de carbono para ambos os cenários, levando em conta a queima do biogás, foi realizada supondo a utilização de queimadores tipo *flare*. O valor final de CRE foi determinado por meio da aplicação da Equação 8, que considera a geração de CH₄ no aterro, estimada pelo método do IPCC, as eficiências do sistema de coleta de gás e do queimador adotado e o dióxido de carbono equivalente do metano.

Segundo o supervisor de operação do aterro estudado, a unidade já conta com sistema de queima de biogás, entretanto não existe um projeto de MDL registrado ou implementado que possibilite a geração e comercialização de créditos de carbono.

Tabela 7. Geração de Crédito de carbono por meio da queima do biogás (CRE)

Cenário	Atual	Ideal
Títulos de crédito de carbono	5.968,71	10.660,81

3.4 Estimativa de retorno financeiro

A estimativa de lucro resultante das negociações dos títulos foi feita levando em conta o preço médio de um título de CRE considerando os valores de venda correspondentes ao Mercado Voluntário Brasileiro (MVB) e ao Mercado Europeu (ME). Sendo o primeiro igual ao valor médio das negociações dos CCs de R\$65,96 para cada título até o dia 03 de fevereiro de 2022, de acordo com a agência (EPBR, 2022), e o segundo equivalente a €57,87 por título de CRE (UDOP, 2021) ou R\$313,08, tomando como base a cotação da moeda na data de realização do cálculo, sendo €1,00 equivalente a R\$5,41.

A diferença de valores entre os mercados é justificada pela não obrigatoriedade de redução de emissões dos gases intensificadores do efeito estufa no Brasil, ao contrário dos países desenvolvidos que necessitam comprar créditos para atingir as metas de redução destes gases (OLIVEIRA, 2022).

Tabela 8. Estimativa de retorno financeiro

Cenário	Com Aproveitamento Energético		Simples Queima do Biogás	
	Atual	Ideal	Atual	Ideal
Títulos de crédito de carbono	1.180,45	2.108,45	5.968,71	10.660,81
Retorno estimado - MVB (R\$)	77.862,5	139.073,4	393.696,1	703.187,0
Retorno estimado - ME (R\$)	369.575,3	660.113,5	1.868.683,7	3.337.686,4

4. DISCUSSÃO

Com os resultados calculados é possível inferir que os valores estimados para a geração de crédito de carbono proveniente do biogás do aterro de Rosário do Catete são maiores para a utilização de queimadores em comparação com o aproveitamento energético em ambos os cenários, conforme mostra a Figura 1.

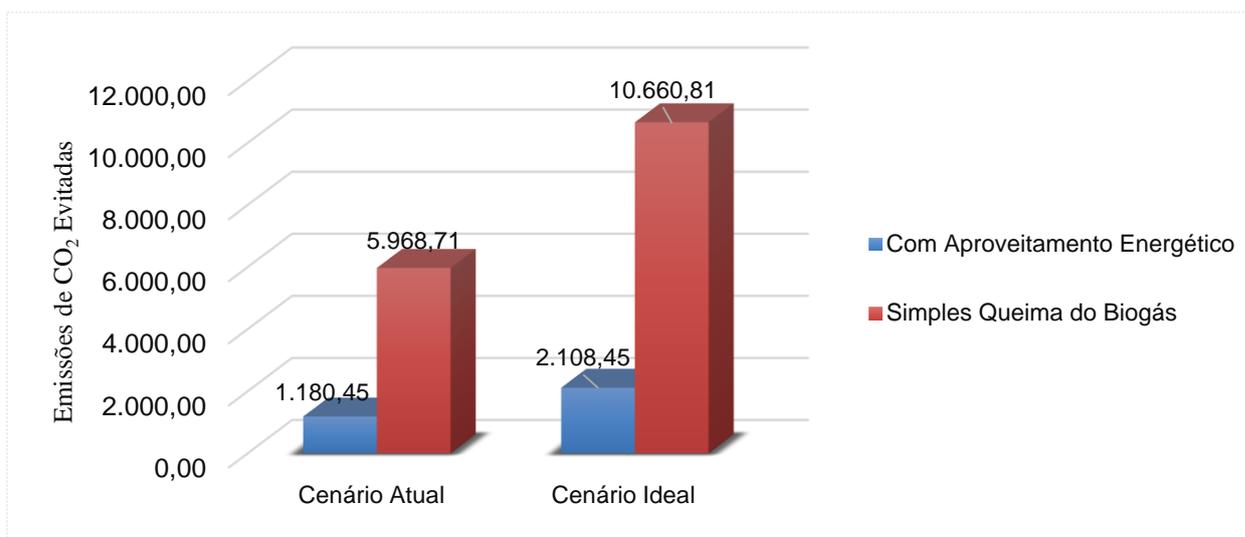


Figura 1. Créditos de carbono gerados

Visto que as emissões de CO_{2eq} evitadas com o aproveitamento energético estão diretamente relacionadas à quantidade de energia produzida, a diferença entre as duas metodologias apresentadas pode ser justificada pela reduzida eficiência na conversão da energia mecânica, resultante da combustão do biogás, em energia elétrica. Entretanto este aproveitamento pode ser visto como um incremento promissor à matriz energética brasileira, proveniente de uma fonte renovável.

Além do retorno financeiro resultante da venda dos títulos de CC do aproveitamento energético, esta metodologia apresenta outras vantagens tais como o uso da energia produzida pelo próprio aterro ou a sua comercialização.

Ao analisar a energia gerada com o aproveitamento energético do biogás de aterro com os resultados obtidos por Oliveira (2022) a respeito da conversão do biogás em energia elétrica proveniente de reatores usados em estações de tratamento de esgoto, notou-se que apesar da menor geração de CH₄ nos reatores em comparação com o volume de biogás gerado no aterro, o valor final de energia resultante do tratamento de esgoto foi superior. Tal fato pode ser justificado pela metodologia empregada, visto que o cálculo desenvolvido por Oliveira (2022) foi feito por meio do *software* ProBio, específico para estimar a geração de biogás em reatores e sua capacidade para gerar energia, e neste estudo foi utilizada uma metodologia mais abrangente.

Ainda a respeito do aproveitamento energético, Montagner (2021), em seu estudo sobre o potencial de geração de biogás no aterro de Cachoeira Paulista – SP, seguindo a mesma metodologia adotada neste estudo, estimou que em 2023, 341,14 m³ de metano captado neste aterro teriam capacidade para produzir 1 MWh. Para o aterro de Rosário do

Catete seriam necessários 402,07 m³ de metano para atingir a cota de 1 MWh no ano de 2021. Além da diferença de anos, que interfere na geração de biogás no aterro, esta diferença pode ser explicada pelos parâmetros adotados por Montagner (2021), a exemplo da eficiência de conversão do motogerador correspondente a 33%.

Em relação aos valores resultantes da simples queima do biogás, estes podem ser ainda maiores, uma vez que a adoção da eficiência dos queimadores tipo *flare* foi feita de maneira conservadora. Segundo os Governos Locais pela Sustentabilidade ICLEI (2009), até 90% do biogás pode ser oxidado termicamente em caso de *flare* enclausurado.

Em comparação com os resultados obtidos por Tomazi (2013) a respeito do potencial de geração de metano no aterro de Marau – RS, baseado no método do IPCC (2020), observou-se que considerando o uso de queimadores tipo *flare* com 50% de eficiência e sistema de captação de gases com eficiência de 70% em sua metodologia, os valores de CH₄ e CO_{2eq} resultante da quantidade de resíduo tratada por este município se assemelham aos resultados do metano e CC provenientes do aterro analisado neste estudo, visto que a cada 94,93t de resíduos tratados no aterro de Marau uma tonelada de CO_{2eq} deixa de ser emitida na atmosfera e em relação ao aterro de Rosário do Catete este dado corresponde a 90,47t para ambos os cenários.

Por fim, ao analisar a geração de CC para o cenário atual e ideal, constatou-se que, se todo resíduo gerado no Estado fosse disposto em aterro, a quantidade de emissões de CO_{2eq} que deixaria de ser emitida ou quantidade de CRE gerada, praticamente duplicaria.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo verificou o potencial dos resíduos sólidos gerados no estado de Sergipe para a geração de créditos de carbono por meio do aproveitamento energético e pela simples queima do biogás gerado, usando valores estimados de emissões de CH₄, segundo o método de decaimento de primeira ordem do IPCC (2000).

Constatou-se que o maior potencial para geração de títulos de créditos de carbono está na simples queima do biogás gerado no aterro, por meio de queimadores tipo *flare*, com a estimativa de geração de 5 968 títulos de CCs para o cenário atual e 10 660 títulos para o cenário ideal. Entretanto o aproveitamento energético, com potencial de geração de 1 180 CREs para o cenário atual e 2 108 para o atual, apresenta outras vantagens em sua utilização, como a geração de eletricidade que pode ser usada nas dependências do próprio aterro ou ser comercializada.

Vale salientar que os resultados de títulos de CCs apresentados, provenientes dos processos de simples queima e do aproveitamento energético do biogás gerado são estimativas gerais do potencial dos resíduos dispostos no aterro analisado, desconsiderando assim, os gases que são gerados nestes processos. Ademais, tanto a simples queima do biogás quanto seu aproveitamento energético apresentam grandes vantagens ambientais, visto que a emissão direta na atmosfera do biogás gerado em aterro, devido à alta concentração de CH₄ é responsável pela intensificação do efeito estufa, prejudicial à vida no planeta.

Devido à atenção voltada para o aquecimento global, o mercado de carbono vem se valorizando cada vez mais, causando grande variação no valor monetário de venda dos CCs. Entretanto, apesar das vantagens ambientais, sugere-se uma análise mais precisa da avaliação econômica em relação à implantação de projetos de MDL para as metodologias adotadas, levando em conta o final da vida útil do aterro, previsto para 2040, apesar da continuada geração de biogás após seu desligamento.

Por fim, conclui-se que o incentivo governamental do estado e a participação mais efetiva dos municípios na busca ao cumprimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos, no que diz respeito à disposição adequada destes resíduos, traria além dos ganhos provenientes da comercialização dos créditos de carbono, incontáveis benefícios ambientais.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza e Resíduos Sólidos Especiais, 2020.

BEZERRA, M. DO C. DE LIMA. **Oportunidades do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo para solução do destino final de resíduos sólidos urbanos: o caso do Distrito Federal**. 5º Seminário Internacional de Planejamento e Gestão Ambiental. **Anais...**2012.

BRASIL. **Lei nº 12.305 - Política Nacional dos Resíduos Sólidos**. Presidência da República, 2010.

BRASIL. **Fatores de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil - Ano Base 2021 - com correções de janeiro a dezembro**. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>>

BRASIL. **Protocolo de Kyoto**. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/entenda-o-assunto/protocolo-de-kyoto>>.

CARDINALLI, M. **O que é Mercado de Carbono e como isso pode beneficiar o Brasil?** Disponível em: <<https://ideiasustentavel.com.br/mercado-de-carbono-oportunidade-brasil/>>.

EPBR. **Biocombustíveis, Política energética, Transição energética.** Disponível em: <<https://epbr.com.br/preco-do-cbio-supera-r-70-na-primeira-semana-de-fevereiro/>>.

FASSONI-ANDRADE, A. C.; MEDEIROS, R. B.; LISBOA, H. DE M. Estimativa de potencial energético de biogás proveniente do aterro sanitário Tijuquinhas (município de Biguaçu/SC). 2016.

GODECKE, M. V. **Estudo das alternativas de valorização econômica para a sustentabilidade da gestão de resíduos urbanos no Brasil.** Dissertação de mestrado. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2010.

ICLEI. **Manual para Aproveitamento de Biogás.** v. 1 - Aterros Sanitários. Governos locais pela sustentabilidade, 2009.

IPCC. **Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories.** Montreal, Canada: INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2000.

IPCC. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Hayama - Japão: INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2006a. v. 3

IPCC. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Hayama - Japão: INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2006b. v. 5

MONTAGNER, P. R. DOS S. **Avaliação do potencial de uso do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica.** Lorena, São Paulo: Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo, 2021.

OLIVEIRA, J. N. DE. **Geração de Créditos de carbono em estações de tratamento de esgoto no estado de Sergipe.** São Cristóvão, SE: Universidade Federal de Sergipe, 2022.

SAJJAD, F. et al. A study on small-scale municipal solid waste management practices and its impact on carbon emission and mitigation cost. [s.d.].

SANTOS, I. F.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. Uma avaliação energética, econômica e ambiental das opções de aproveitamento energético do biogás de um aterro sanitário no Brasil. 2015.

SANTOS, M. M.; ROMANEL, C.; ELK, A. G. H. P. VAN. Análise da eficiência de modelos de decaimento de primeira ordem na previsão da emissão de gás de efeito estufa em aterros sanitários brasileiros. **Eng Sanit Ambient**, 2017.

SCARLAT, N. et al. Evaluation of energy potential of Municipal Solid Waste from African urban areas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2015.

SILVA, L. F. DA; MACEDO, A. H. DE. Um estudo exploratório sobre o crédito de carbono como forma de investimento. **Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 8, 2012.

SNIS. **Diagnóstico Temático: Serviços de água e esgoto**. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2021.

TOMAZI, R. L. **Potencial de geração de metano do aterro sanitário de Marau - RS**. Curitiba, Paraná: Universidade Federal do Paraná, 2013.

UDOP. **Mercado de crédito de carbono avança no mundo e Brasil pode ganhar com isso**. União Nacional de Bioenergia. Disponível em: <<https://www.udp.com.br/noticia/2021/07/22/>>.