

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS NO ATERRO SANITÁRIO DE ANÁPOLIS-GO

Gerson da Silva Costa **Reis**¹, Tarcísio de Souza **Carvalho**²

(1 – Faculdade Metropolitana de Anápolis - FAMA, gersonscr.esa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0718-4650>; 2 – Faculdade Metropolitana de Anápolis – FAMA, tarcisio.qmc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8697-7861>)

Resumo: O presente trabalho visa avaliar a viabilidade técnica e econômica para o aproveitamento energético do biogás no Aterro Sanitário de Anápolis-GO. Assim, inicialmente considerou-se a implantação de um sistema de geradores a biogás para a conversão do mesmo em energia elétrica. Sistema no qual funcionaria como de minigeração distribuída com compensação de energia, que atuaria principalmente como fornecedor de energia elétrica para as unidades consumidoras presente dentro do aterro, sendo o galpão de triagem, prédio administrativo, guarita de pesagem e o sistema de iluminação. Portanto, as análises mostraram que o sistema em questão seria viável economicamente, podendo gerar durante seu respectivo ano de operação um total de 202,70 GWh, cerca de 41,9% da energia total disponível durante toda a vida útil do aterro.

Palavras-chave: energia renovável; gás de aterro; resíduos sólidos urbanos.

ANALYSIS OF TECHNICAL ECONOMIC FEASIBILITY FOR THE ENERGY USE OF BIOGAS AT LANDFILL OF ANÁPOLIS-GO

Abstract: The present work aims to evaluate the technical and economic feasibility for the biogas energy utilization in the Anápolis-GO Landfill. Initially, it was considered the implantation of a system of biogas generators for the conversion of the same in electric energy. This system would function as a distributed minigeration with energy compensation, which would act mainly as supplier of electric energy for the consumer units present inside the landfill, being the sorting shed, administrative building, weighing guard and the lighting system. The analyzes showed that the system in question would be economically feasible,

generating during its respective year of operation a total of 202,70 GWh, about 41,9% of the total energy available during the entire life of the landfill.

Keywords: renewable energy; landfill gas; urban solid waste.

ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA EL USO DE ENERGÍA DE BIOGÁS EM RELLENO SANITARIO DE ANÁPOLIS-GO

Resumen: El presente estudio pretende evaluar la viabilidad técnica y económica para el uso de energía de biogás en el relleno sanitario de Anápolis-GO. Así, inicialmente se considera la implementación de un sistema de generadores de biogas para convertir la misma en energía eléctrica. Sistema en que trabajo como pequeña generación distribuida con compensación de energía, que actuaría como un proveedor de energía eléctrica a las unidades de consumo presentes dentro del vertedero y la vertiente de investigación, edificio administrativo, caja de pesaje y sistema de iluminación. Por lo tanto, el análisis mostró que el sistema en cuestión sería viable económicamente y puede generar para su respectivo año de funcionamiento un total de 202,70 GWh, aproximadamente el 41,9% de la energía total disponible durante toda la vida del vertedero.

Palabras clave: energías renovables; gas de relleno sanitario; residuos sólidos municipales.

Introdução

A geração atual aponta para um permanente crescimento econômico e consumo desenfreado de energia, tendo como consequência o desequilíbrio ambiental no planeta Terra, fato consequente das explorações das fontes energéticas não renováveis, e, caso não haja um enorme empenho direcionado para nossas atividades econômicas, a qualidade de vida das gerações futuras estará comprometida. Assim, a busca por tecnologias renováveis podem ser soluções viáveis destes crescimentos (BUENO, 2002; LIMA *et al.*, 2013).

Dentre as alternativas, umas das energias que vem crescendo e despertando interesse para minimizar tal desequilíbrio é através do aproveitamento energético do biogás obtido pela biodegradação anaeróbica dos resíduos sólidos dispostos em aterros. Sua composição se dá principalmente pela mistura gasosa entre o metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), gases que possuem um enorme potencial para o agravamento do efeito estufa (COSTA *et al.*, 2015). Destes, comparando-se em um período de 100 anos, o CH₄ é o gás de efeito estufa (GEE) com maior potencial de aquecimento global, 29,8 vezes mais que o CO₂, e num período de 20 anos é ainda maior, 82,5 vezes (IPCC, 2021). Para mitigar tais emissões, os técnicos responsáveis

pelo aterro sanitário podem optar por coletar ou queimar os gases (LEE *et al.*, 2017).

Assim, a coleta do biogás nos aterros sanitários é de grande importância para que se tenha possibilidade de gerar energia alternativa, podendo eventualmente trazer benefícios ambientais como a mitigação da degradação do meio ambiente causada pelas emissões do GEE (COSTA *et al.*, 2015; LEE *et al.*, 2017; HUANG e FOOLADI, 2021).

O gás de aterro recuperado pode ser utilizado na geração de energia elétrica, através da combustão em dispositivos de conversão, no qual a eletricidade gerada pode, indiretamente, reduzir as emissões de GEE nos aterros sanitários em 44% (LEE *et al.*, 2017). No Brasil, 86% do biogás produzido é preferencialmente aplicado na geração de energia elétrica, consequência dos benefícios fiscais recorrentes, como redução de impostos e mecanismo de compensação de energia (KANDA *et al.*, 2022).

Ainda, a produção de biocombustíveis pelo biogás, como o biometano, bioetanol e bio-óleo, podem substituir, gradativamente, os combustíveis fósseis tradicionais, como o gás natural e os combustíveis veiculares, reduzindo, de maneira exponencial, as emissões de GEE e o uso dos recursos naturais (LEE *et al.*, 2017; LOMBARDIA *et al.*, 2011).

Nesse sentido, o presente trabalho visa avaliar a viabilidade para implantação de um sistema de geração de energia para o aproveitamento do biogás gerado a partir do Aterro Sanitário de Anápolis – GO. Desse modo, o objetivo foi analisar a geração de resíduos sólidos urbanos e do biogás, o potencial da geração de energia pela conversão do biogás, a viabilidade econômica para uso energético, e avaliar os benefícios ambientais que a implantação do sistema de geração de energia no aterro poderia proporcionar.

Material e métodos

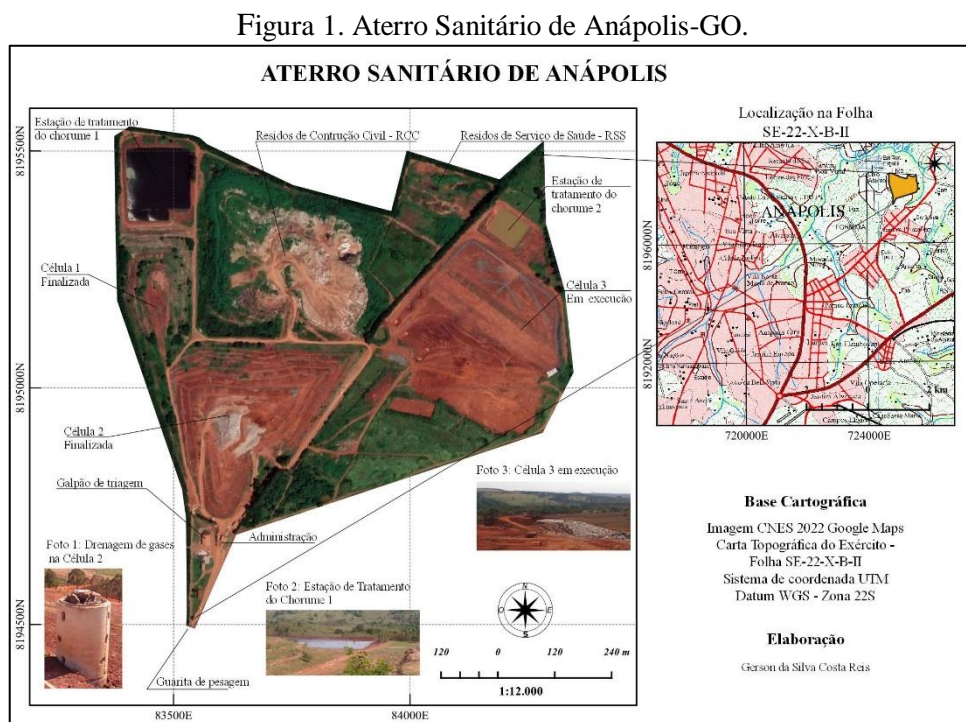
Local de estudo

O presente estudo foi realizado no Aterro Sanitário de Anápolis, Goiás, localizado na região nordeste do município, cerca de 3 km do centro da cidade. Segundo Colvero & Souza (2016), o aterro possui uma área total de 31,383 hectares, recebendo diariamente cerca de 285 toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU). A área passou a ser utilizada como aterro a partir do ano de 1998, e encontra-se licenciada desde 2014 para receber os resíduos classe II-A e B e resíduos de serviço de saúde dos grupos A, D e E (COLVERO & SOUZA, 2016).

Em 2018, a Prefeitura de Anápolis firmou parceria, através do consórcio GC Ambiental, para recebimento de RSU dos municípios (circunvizinhos) Campo Limpo, Ouro Verde e Teresópolis. Os três municípios juntos produzem cerca de 3% com relação a Anápolis

(ITAGIBA, 2018).

Assim, para identificação do local de estudo, a Figura 1 mostra a situação e as estruturas físicas do Aterro Sanitário de Anápolis, onde se observa a presença do sistema de tratamento do chorume (Figura 1 – Foto 2), os drenos de gases (Figura 1 – Foto 1) e a execução de uma nova trincheira (Figura 1 – Foto 3).



A partir de visitas técnicas ao local de estudo, conduzida em 2017, pode-se verificar que a maioria dos drenos não estavam realizando a queima do gás, sendo estes presentes nas células já finalizadas. Conforme, Sibeles Maki de Souza¹, responsável pela operação do aterro, o possível motivo se dá pela baixa degradação dos resíduos dispostos, logo há uma baixa produção do biogás.

De fato, ressalva-se que a geração do biogás é passível de variações influenciadas por múltiplos fatores, tais como: composição e umidade dos resíduos, tamanhos das partículas (estado físico dos resíduos), pH, temperatura, nutrientes, bactérias, potencial de oxidação-redução, compactação dos resíduos, dimensões do aterro (área e profundidade), operação do aterro e processamento de resíduos variáveis (BRITO FILHO, 2005).

A drenagem dos gases no aterro consiste em um sistema de drenos verticais interligados diretamente ao sistema de drenagem do chorume. Os drenos constituem-se por

¹ Entrevista fornecida por Sibeles Maki de Souza, em 2017.

tubos de concretos drenados (Figura 1 – Foto 1) revestidos por pedras tipo maroadas, instalados desde a base inferior da célula até a superfície a uma distância de 20 m de um dreno a outro. Na parte superior dos drenos é realizado a queima dos gases com objetivo de reduzir os possíveis impactos causados pelas emissões do GEE.

Metodologia

Inicialmente, para a projeção da população e da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) utilizou-se os dados do IBGE: Censo Demográfico de 2010 e Estimativas de 2011 a 2017. Para a projeção populacional foi utilizado o cálculo da progressão geométrica com ajuda do software Microsoft® Excel®, sendo aplicado a Equações (1) e (2) respectivamente:

$$P_t = P_0 \cdot (1 + i)^{t-t_0} \quad (1)$$

$$i = \frac{P^{t-t_0} - P_0}{P_0} \quad (2)$$

Sendo que:

P_t = população estimada no ano t (hab); P_0 = população no ano t_0 (hab); e i = taxa de crescimento geométrico.

Após a projeção populacional pode-se obter a projeção de RSU com base na estimativa da geração de RSU no ano de 2014 (Tabela 1) estipulado pelo Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Anápolis (PREFEITURA DE ANÁPOLIS, 2015). Para efeito deste trabalho, optou por considerar apenas os resíduos gerados na região metropolitana Anápolis-GO, de modo a se obter resultados mais conservadores.

Tabela 1. Estimativa da geração de RSU em Anápolis-GO.

Tipo de resíduo	Quantidade (t)
Resíduos domiciliares, da varrição, da limpeza de feiras livres e de pequenos comércios coletados de forma convencional	98.668,11
Resíduos recicláveis coletados seletivamente	583,10
Demais resíduos provenientes dos serviços de limpeza urbana (galhada de poda de árvore, capina e limpeza de feiras livres)	2.610,12
Total	101.861,33

Fonte: Prefeitura de Anápolis (2015).

O cálculo da projeção de RSU se dará a partir do índice de geração per capita resultante da divisão entre a geração anual de RSU em 2014, com a população atendida pela coleta de RSU no município em 2014, cerca de 98,25% conforme cita Prefeitura de Anápolis (2015). Sendo considerado um índice de crescimento de 1% ao ano, sugerido por Barros

(2012), em uma projeção de 2014 a 2034.

Após a projeção de RSU, pode-se calcular a estimativa de geração de biogás no aterro, para isso foi utilizado o programa LandGEM[®] (*Landfill Gas Emissions Model*) da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos-USEPA (*United States Environmental Protection Agency*), que faz uso da Equação (3) de primeira ordem para estimar emissões anuais de metano no período de tempo determinado (USEPA, 2005).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k \cdot L_o \cdot \left(\frac{M_i}{10}\right) \cdot e^{-kt_{ij}} \quad (3)$$

Sendo que:

Q_{CH_4} = geração anual de metano no ano do cálculo (m^3 /ano); k = taxa de geração de metano (ano^{-1}); L_o = potencial de geração de metano (m^3 /Mg); $i = 1$ - incremento de tempo de um ano; $j = 0,1$ - incremento de tempo de 0,1 ano; n = ano do cálculo (ano inicial de recebimento de resíduos); M_i = massa de resíduos recebido no ano i (Mg) e t_{ij} = idade da massa de resíduo M_i depositados no ano i .

O programa LandGEM[®] (versão 3.02) consiste em um modelo matemático capaz de estimar as emissões de gases em aterros sanitários, por meio do uso de dados iniciais fornecidos pelo usuário, tal como a geração anual de resíduos e o período de atividade do aterro, assim como, os parâmetros de entrada k e L_o , que já constam especificados no programa. A ferramenta utiliza da interfase do Microsoft[®] Excell[®] para estimar as taxas de emissão de gás total de aterro, metano e dióxido de carbono em um período de tempo já determinado (140 anos) (USEPA, 2005).

Sendo considerado os parâmetros padrões pelo software como: $k = 0,05 \text{ ano}^{-1}$, $L_o = 170 \text{ m}^3/\text{Mg}$ e porcentagem de 50% de metano presente no gás de aterro, estes sendo os valores convencionais já estabelecidos pelo programado.

Para o cálculo da geração de energia pelo biogás, Santos (2015) argumenta que para calcular o potencial de geração de energia elétrica com uso do biogás, deve ser levado em consideração a vazão de gás, eficiência de coleta de biogás, poder calorífico do biogás e eficiência da tecnologia de conversão utilizada. Tais fatores serão usados para descobrir as potências com o uso da Equação (4), modificada por Barros (2012) de CETESB (2006).

$$P = Q_{CH_4} \cdot E \cdot E_C \cdot P_{CCH_4} \cdot \left(\frac{1}{1000} \cdot \frac{1}{31536000}\right) \quad (4)$$

Sendo que:

P = potência disponível anualmente (kW); Q_{CH_4} = vazão anual de gás (m^3 /ano); P_{cCH_4} = poder calorífico do metano (MJ/m^3); Ec = eficiência da coleta de gás no aterro (%); e E = eficiência da turbina/motor (%).

Os parâmetros utilizados na Equação 4 serão os considerados por Lopes (2017): poder calorífico do gás de aterro de $16,8 MJ/m^3$, considerando-o como combustível de médio teor, este depende do nível de tratamento, conforme classificação pelo Banco Mundial (CONESTOGA-ROVERS & ASSOCIATES, 2004); eficiência de coleta de gás no aterro de 65% e utilização de motor ciclo Otto (motor a pistão) com eficiência de 33%.

Para geração de energia optou pela preferência dos motores a combustão interna, ciclo Otto, devido ao maior rendimento elétrico e menor custo de investimento, quando comparado a outras tecnologias (Tabela 2) (ICLEI, 2009; PAWANANONT e LEEPHAKPREEDA, 2017). No entanto, são necessárias pequenas modificações nos sistemas de alimentação, ignição e compressão para que haja a queima do biogás no motor (ICLEI, 2009).

Tabela 2. Tecnologias de conversão energética, relação entre custo e rendimento.

Equipamento	Custo (R\$/kW)	Rendimento (%)
Motor Ciclo Otto	3.539,76 ^[1]	33 ^[2]
Motor Stirling	5.679,63 ^[4,5]	18 ^[3]
Ciclo Rankine Orgânico	6.576,80 ^[4,5]	20 ^[3]
Ciclo Brayton: Turbina a gás	8.329,16 ^[1]	28 ^[2]
Microturbina	11.660,81 ^[1]	25 ^[2]

^[1] Atualizado por meio da Calculadora do Cidadão do Banco Central do Brasil (2022a) com base no IGP-M de 06/2006 para 01/2022; ^[2] Com base em Santos (2015); ^[3] Com base em Pawanant e Leephakpreeda (2017); ^[4] Atualizado por meio da calculadora do U.S. Bureau of Labor Statistics (2022) de 05/2017 para 01/2022; ^[5] Convertido do dólar na cotação de 01/2022, pelo Conversor de Moedas do Banco Central do Brasil (2022b).

Fonte: adaptado de Cetesb (2006) e Pawanant e Leephakpreeda (2017).

Em seguida, é possível calcular as energias passíveis de serem geradas, segundo a Equação (5), modificada por Lopes (2017) de CETESB (2006).

$$E = P.8760 \quad (5)$$

Sendo que:

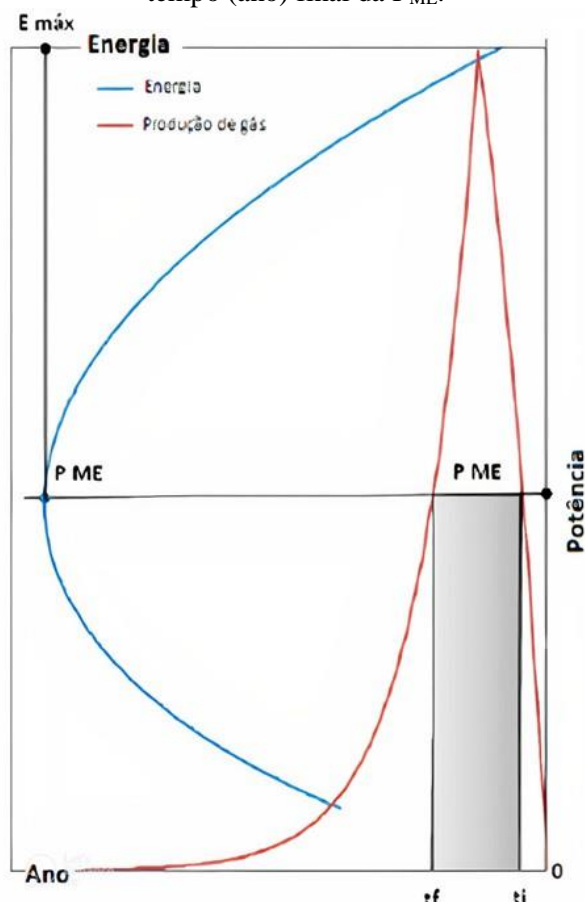
E = energia disponível anualmente (kWh); e P = potência disponível anualmente (kW).

Conforme Santos (2015), para que haja uma maior produção de energia e que seja viável na visão econômica, será aplicado o método escalonado para aproveitamento energético de biogás de aterros sanitários, este incide na aplicação de grupos geradores atuando em plena

carga, funcionando somente no período de tempo de tal modo que estes podem ser totalmente supridos pelo gás de aterro.

Assim sendo, a escolha da potência do grupo gerador corresponde à potência que resulta na máxima produção energética (P_{ME} – Figura 2; Equação 5), desde que combinada com o tempo de disponibilidade da vazão de gás para suprir tal gerador (Δt) (SANTOS, 2015).

Figura 2. Potência máxima da produção de energia (P_{ME}), onde: t_i = tempo (ano) inicial da P_{ME} e t_f = tempo (ano) final da P_{ME} .



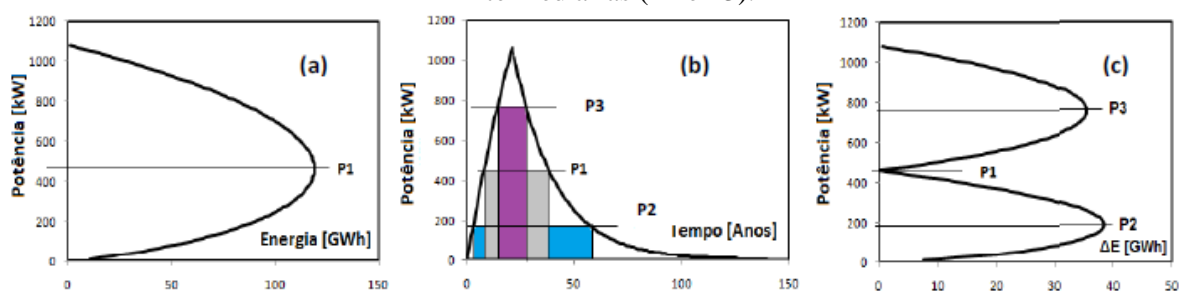
Fonte: Santos (2015).

O tempo de disponibilidade Δt ($t_f - t_i$) é obtido pela interseção entre a curva de potência disponível do aterro com cada valor de potência (cuja equação de melhor ajuste é obtida com a ajuda do software Microsoft® Excel®). Após este primeiro grupo gerador, outros geradores adicionais poderão ser escolhidos como sendo aqueles que incrementem uma maior produção energética ao aterro, como exemplifica a Figura 3 (SANTOS, 2015).

Com a adição de novos grupos de geradores, aumenta-se a produção energética, mas também o investimento e os custos de operação e manutenção, onde a receita do acréscimo de energia passa a não superar os custos incrementais. Portanto, o aproveitamento energético em

aterros deve conter no máximo 3 grupos geradores, pois com a adição de mais módulos resultará em um maior aumento de custo do que de energia (SANTOS, 2015). Deste modo, a fim de alcançar maior custo-benefício, será adotado para as análises do sistema de geração de energia no Aterro Sanitário de Anápolis apenas um grupo gerador.

Figura 3. Escalonamento do grupo de geradores. (a): definição da potência de maior produção energética P1; (b) implantação destas potências na curva de produção de biogás; e (c) potências intermediárias (P2 e P3).



Fonte: Santos (2015).

Em seguida, para a análise econômica do sistema de aproveitamento energético do biogás no Aterro Sanitário de Anápolis, foram considerados os parâmetros da Tabela 3, como também os componentes necessários para a instalação do sistema de aproveitamento do gás de aterro de forma energética, conforme a Tabela 4.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados para a análise econômica do sistema.

Parâmetros	Valor
Custo de Manutenção e Operação do Sistema	10% do Investimento Inicial
Taxa de Desconto	12% /ano
Comprimento das Tubulações	500 m*

* Valor representativo.

Fonte: Santos (2015)

Tabela 4 - Componentes mínimos para a implantação do sistema e respectivos custos.

Equipamentos	Valor*	Unidade
Motor Ciclo Otto	3.539,76	R\$/kW
Queimador (flare)	666.306,98	R\$/unidade
Compressão	1.674,10	R\$/m ³ /h
Tratamento do Gás	0,10	R\$/m ³ /h
Tubulação de coleta/ Gasoduto	836,01	R\$/m

* Atualizado pela Calculadora do Cidadão do Banco Central do Brasil (2022a) com base no IGP-M de 06/2006 para 01/2022.

Fonte: adaptado com base em Cetesb (2006).

Tendo em vista, para verificar a viabilidade econômica do sistema, foram analisados o fluxo de caixa por meio do Valor Presente Líquido (VPL) a Taxa Interna de Retorno (TIR) o

Tempo de Retorno do Investimento (TRI) e Análise de Sensibilidade do VPL. Assim, quando o VPL, dado pelas Equações (6) e (7), resulta em um valor positivo, a iniciativa é viável economicamente (LOPES, 2017).

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC}{(1+i)^t} \quad (6)$$

$$FC = Ec \cdot T - C_{om} \quad (7)$$

Sendo que:

Ec = energia gerada anualmente; FC = fluxo de caixa; i = taxa de desconto; n = vida útil do projeto; T = tarifa de venda de energia; e C_{om} = custo de operação e manutenção.

Conforme Lopes (2017), foi realizada também uma análise considerando a negociação de créditos de carbono do gás de aterro, com base nas Equações (8) e (9) modificadas por Santos (2015) de CETESB (2006).

$$CC_{queima} = Q_{CH_4} \cdot f_1 \cdot \eta_{queima} \cdot Vc \cdot \rho \quad (8)$$

$$CC_{geração} = FEv \cdot E \cdot Vc \quad (9)$$

Sendo que:

CC_{queima} = crédito de carbono devido à combustão nos queimadores e motores (R\$); Q_{CH_4} = vazão de gás; f_1 = fator de equivalência entre uma tonelada de CO_2 e CH_4 igual a 21; η_{queima} = eficiência da queima (90%); Vc = valor dos créditos de carbono; ρ = massa específica do metano (0,67 kg/m³); $CC_{geração}$ = crédito de carbono pela geração de eletricidade (R\$); E = energia gerada (MWh) e FEv = fator de emissão evitada (tCO₂): FEv adotado com base no Sistema Interligado Nacional (SIN) (BRASIL, 2016) em 0,0817 tCO₂/MWh.

Assim como, foi feito uma análise dos benefícios ambientais, para tal foi utilizado a Calculadora de Benefícios LFGE[®] (*landfill gas energy*) da USEPA, ferramenta que usa da interface do Microsoft[®] Excell[®] para estimativas direta, evitada e de reduções totais de gases de efeito estufa (GEE), no qual expressa reduções de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) equivalente em benefícios ambientais (USEPA, 2016).

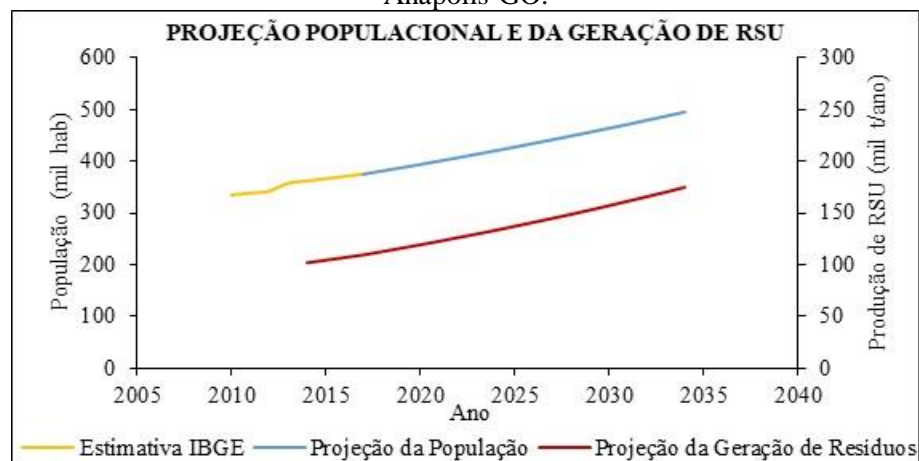
Conforme a USEPA (2016), a calculadora de benefícios energéticos do gás de aterro pode ser usada para estimar reduções diretas, evitadas e de Gases de Efeito Estufa (GEE), bem como em benefícios ambientais e energéticos. Tanto para a geração de energia elétrica como para projetos diretos (como exemplo a queima realizada no *flare*), as reduções das emissões de GEE derivam da captura e destruição do CH₄ no aterro sanitário.

Resultados e Discussão

A partir dos dados do IBGE (2010 a 2017) e com o uso do método de projeção geométrica, Equação (1), projetou-se a população do município de Anápolis conforme a Figura 10, observou-se nos últimos sete anos um crescimento aproximado de 12,11%. Com a utilização do método geométrico obteve-se uma taxa de crescimento geométrico de 1,65% dada pela Equação (2). Percebe-se um crescimento populacional moderado no município ao longo dos anos.

Em posse da geração de RSU e do dado populacional referente ao ano de 2014, obteve-se o índice de geração per capita de resíduos aproximado em 0,78 kg/hab.dia. A partir disso, aplicou-se 1% ao índice e multiplicou com a população do ano de 2015, obtendo-se a geração diária de resíduos, que por sua vez multiplicou-se pelo total de dias no ano (365 dias), resultando na geração anual de RSU em Anápolis, e assim sucessivamente. Desse modo, os dados resultaram na projeção de RSU observada conforme a Figura 5, gráfico referente ao período de 2014 a 2034.

Figura 5. Projeção da população e da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) do município de Anápolis-GO.



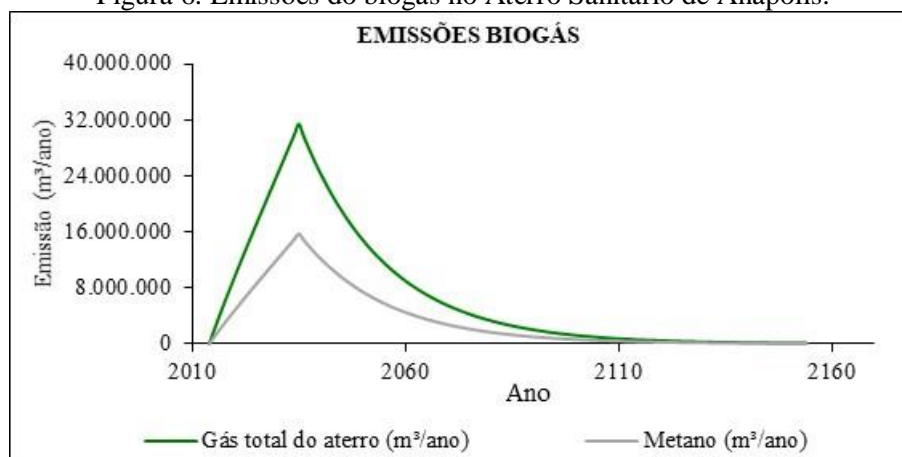
Fonte: Próprio Autor (2022).

Considerando que a coleta atenda 98,25% da região, conforme cita o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Anápolis (PREFEITURA DE ANÁPOLIS, 2015), o aterro sanitário de Anápolis deverá receber mais de 2.800.000 toneladas de RSU no cenário de 20 anos.

Com o uso do software LandGen® e da posse da geração de RSU, fez-se a projeção das emissões de biogás ao longo dos anos, conforme a Figura 6. Observa-se uma geração de biogás aproximada de 31,4 milhões m³/ano no ápice da curva, e uma geração de 15,7 milhões

m³/ano em emissões de metano. Percebe-se que as emissões tende a diminuir após o último ano de disposição dos RSU's no aterro.

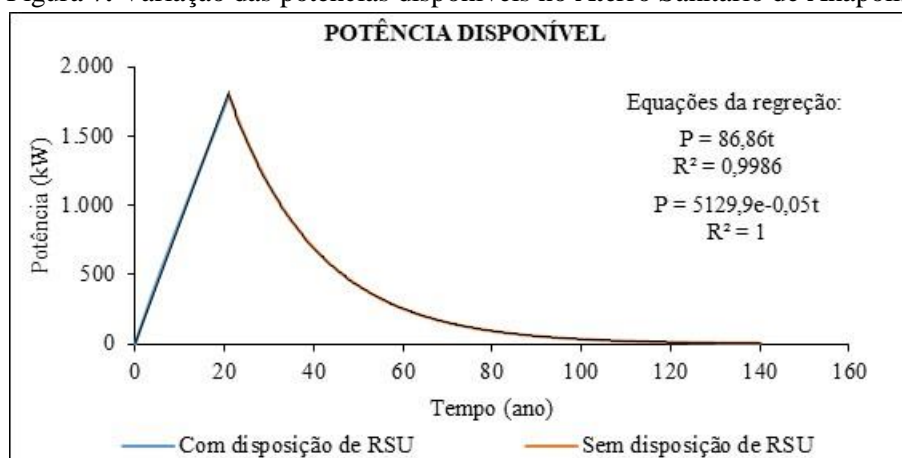
Figura 6. Emissões do biogás no Aterro Sanitário de Anápolis.



Fonte: Próprio Autor (2022).

A partir destes valores e com o uso da Equação 2 se obtém o gráfico das variações potenciais disponíveis no aterro, conforme observa-se na Figura 7. O gráfico demonstra um ápice de produção energética que chega perto de 1800 kW de potência, este sendo relativo ao último ano em que são depositados os resíduos. Os resultados demonstram que as potências variam conforme a produção de biogás, possuindo a tendência de se estabilizar após o término das operações do aterro.

Figura 7. Variação das potências disponíveis no Aterro Sanitário de Anápolis.

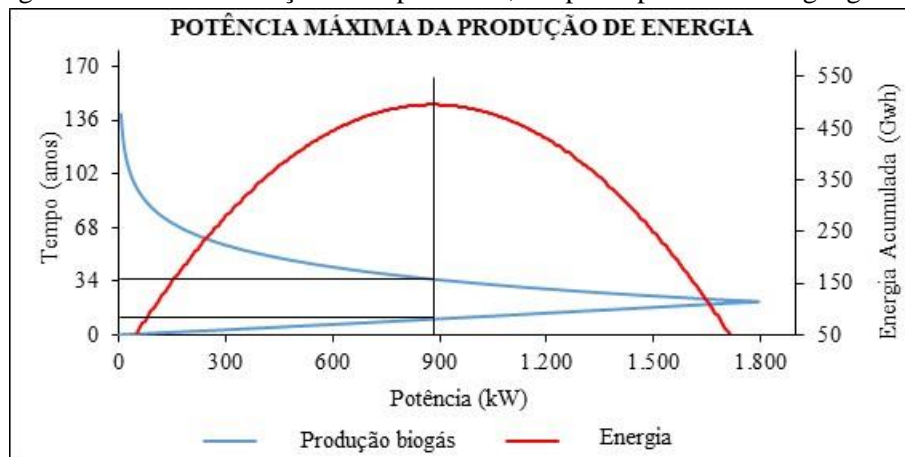


Fonte: Próprio Autor (2022).

Neste momento, conforme Santos (2015) acertadamente propõe a energia suscetível de

ser gerada por cada uma das potências pode ser encontrada. Nota-se pela Figura 8 que a potência do grupo gerador a ser implantado, que resultaria na máxima produção energética P_{ME} , é cerca de 890 kW, sendo disponível em um período de 25 anos.

Figura 8. Gráfico da relação entre potências, tempo disponível e energia gerada.



Fonte: Próprio Autor (2022).

Após calculada as potencias, pode-se planejar o sistema pelo método escalonado. Com fundamento na observação da potência com maior incremento energético, referente ao resultado obtido pela Figura 8, e considerando o uso de um grupo gerador, o sistema iniciaria no décimo ano com uma potência de 890 kW (Figura 9).

Figura 9. Potência disponível e instalada do sistema de aproveitamento do biogás.



Fonte: Próprio Autor (2022).

Conforme cita Santos (2015), a vida útil considerada para os módulos geradores seria de 10 anos, neste caso, o sistema em questão permitiria a venda dos módulos no último ano de

funcionamento do projeto, pois os mesmos funcionariam por apenas 5 anos. Observa-se pela Figura 10, que durante a vida útil deste projeto, que seria de 25 anos, a energia gerada chegaria a 202.706,00 MWh, que corresponde cerca de 41,9% da energia disponível em um intervalo de 140 anos, parâmetro este utilizado pelo programa LandGEM® como o tempo final para a geração do gás de aterro.

Figura 10. Energia disponível e energia gerada pelo sistema.



Fonte: Próprio Autor (2022).

Com o planejamento já definido, pode-se calcular o valor presente líquido (VPL), considerando o preço para venda de energia sendo R\$ 639,00 /MWh, valor este praticado no Leilão A-5/2021 pela ANEEL (2021) para energias provenientes de Resíduo Sólido Urbano (RSU).

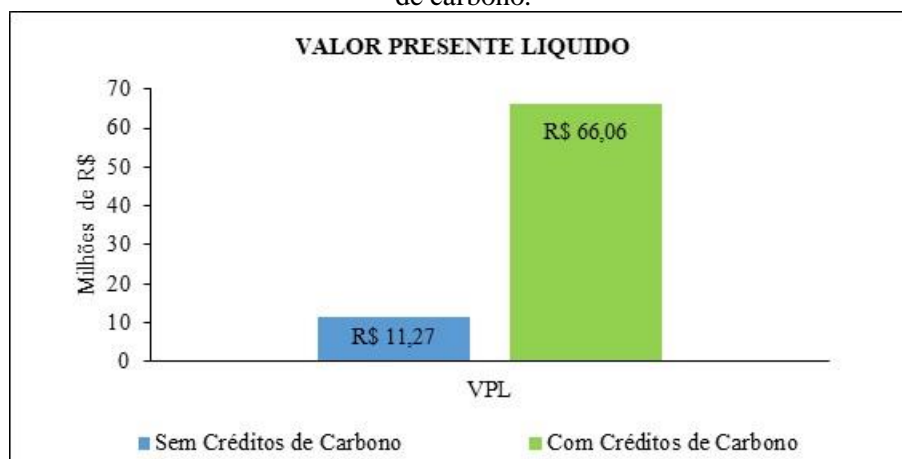
Para efeito de análise, se fez o cálculo de investimento inicial, sendo R\$ 5.724.719,03 com custo de operação e manutenção em R\$ 572.471,90 por ano.

Assim, analisou a viabilidade econômica do projeto, primeiramente sem considerar à venda dos créditos de carbono, onde se obteve VPL de R\$ 11,27 milhões (Figura 11) com uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 45% sobre o investimento inicial, com Tempo de Retorno do Investimento (TRI) em 2,01 anos. O resultado do VPL com a venda de créditos de carbono foi de R\$ 66,06 milhões (Figura 11), este considerando-se o valor de € 75,01 por tonelada de carbono (INVESTING, 2022) a uma cotação de R\$ 5,5589 por euro (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2022b), e tem-se uma TIR 141% e TRI em 0,73 anos.

Outro cenário utilizado para análise econômica foi à comercialização de energia no Mercado Livre. O mercado livre de energia elétrica, também conhecido como Ambiente de Contratação Livre (ACL), consiste em um ambiente em que os consumidores possuem o

poder de escolher seus respectivos fornecedores de energia, desempenhando seu direito à portabilidade da conta de luz, ou seja, consumidores e fornecedores negociam livremente as condições de contratação de energia (ABRACEEL, 2016).

Figura 11. Resultado da análise econômica, comparação entre os casos com e sem venda de créditos de carbono.



Fonte: Próprio Autor (2022).

Devido as variações nos preços de comercialização de energia no Mercado Livre, foi utilizado o preço médio anual comercializado entre março de 2021 a março de 2022, cerca de R\$ 261,25 /MWh (CCEE, 2022). Os impostos sobre o ICMS, PIS/COFINS não se aplica nesse caso devido a adesão do Estado de Goiás ao Convênio ICMS N° 16 DE 22/04/2015 (SECIMA, 2017), que isenta fornecedores de energia elétrica de micro e minigeração.

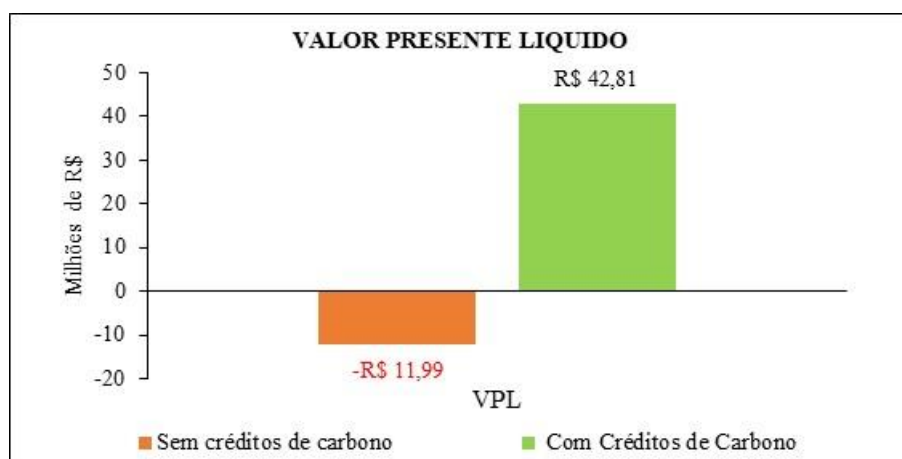
Para tal, foi considerado o sistema como o de minigeração distribuída, com compensação de energia, atendendo a Resolução Normativa n° 482/2012 alterada pela Resolução Normativa n° 687/2015 da ANEEL (ANEEL, 2012), e a Norma Técnica n° 71 da CELG D (CELG, 2016).

A minigeração distribuída consiste em uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada entre 75 kW a 5 MW com origem em fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição através da instalação de unidades consumidoras (ANEEL, 2014). Já o sistema de compensação de energia, conhecido internacionalmente como *Net Metering*, consiste na medição do fluxo de energia, por meio de um único medidor, de uma determinada unidade consumidora dotada de pequena geração, em que o consumidor recebe créditos em energia, isto é, em kWh na próxima fatura (BLEY JR, 2012).

O sistema em questão com a venda no mercado livre resultou em um VPL de R\$ -

11,99 milhões, tornando-o inviável nesse caso, conforme a Figura 12. Porém, com a venda de créditos de carbono chegaria há R\$ 42,81 Milhões, com TIR de 92% e TRI em 1,15 anos. Verificou-se nesse caso viabilidade apenas com venda de crédito de carbono.

Figura 12. Resultado da análise econômica considerando a venda de energia no mercado livre.



Fonte: Próprio Autor (2022).

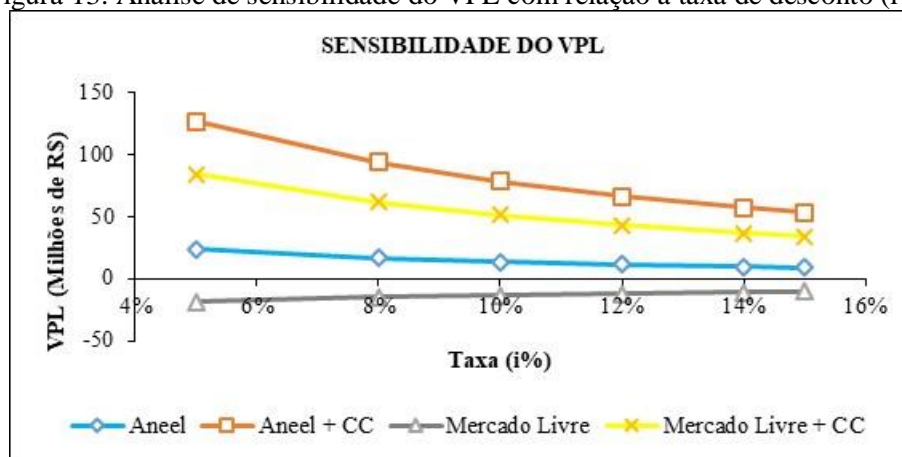
Dito isto, o resultado obtido nos dois cenários, mostrou-se viabilidade econômica para o sistema de aproveitamento energético do biogás no Aterro Sanitário de Anápolis. No segundo cenário a venda de créditos de carbono se mostra necessário para evitar uma Taxa Interna de Retorno negativo. Assim, obteve-se resultados mais atrativos quando há a venda de energia no mercado de créditos de carbono, onde o preço do MWh médio anual praticado é maior em relação ao praticado no Leilão A-5/2016 da ANEEL.

Agora, para efeito da análise econômica, se fez uma análise de sensibilidade da viabilidade com relação as variáveis dos parâmetros do projeto, taxa de desconto (i), valor da tonelada de créditos de carbono (CC) e tarifa da venda de energia proveniente de RSU. Para análise destes, foram considerados os valores da taxa entre 5% (otimista, juros baixos) e 15% (pessimista, juros altos), da tonelada de CC entre 0 (sem crédito carbono) e 500 [R\$/ton] (otimista, considerando o atual aquecimento do mercado de CC) e da tarifa entre 50 (pessimista), 700 (otimista) [R\$/MWh]. Para tal, foi escolhido o VPL (parâmetro de viabilidade econômica) para análises de sensibilidade.

Assim, ao analisarmos a Figura 13 percebe-se que o projeto se mostra, evidentemente, viável, visto que ao praticar-se juros altos, o sistema ainda é economicamente atraente. Porém, pela Figura 14, a viabilidade só haverá com tarifas a partir de R\$450/MWh, tanto para os preços praticando pelo Mercado Livre, quanto para os praticados pelo Leilão da Aneel. Já

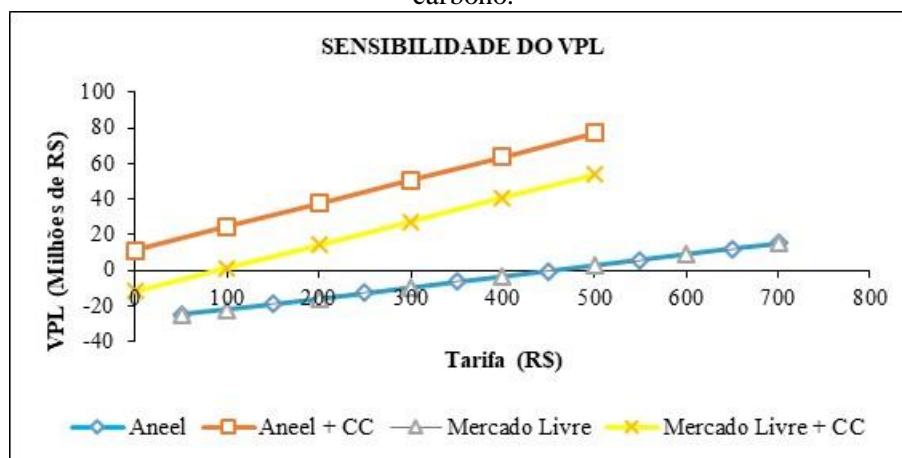
com relação as cotações de CC, a inviabilidade começa a ser verificada em preços abaixo de R\$100/ton. Outrossim, a atual tarifa do Leilão da Aneel viabiliza sem a necessidade de venda de CC.

Figura 13: Análise de sensibilidade do VPL com relação a taxa de desconto (i%).



Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 14: Análise de sensibilidade do VPL com relação as tarifas de venda de energia e créditos de carbono.



Fonte: Próprio Autor (2022).

Ainda, podemos analisar os benefícios ambientais e energéticos do sistema. O resultado conduzido pelo software LFGE® da USEPA, mostrou que a implantação do projeto no Aterro Sanitário de Anápolis traria benefícios anuais equivalentes a: redução de 1.773 toneladas de metano por ano e redução de 5.136 toneladas de dióxido de carbono por ano, emitidos diretamente do aterro sanitário.

Os benefícios totais pela implantação do sistema de aproveitamento energético do biogás no Aterro Sanitário de Anápolis, são aproximadamente iguais a qualquer um dos

seguintes benefícios ambientais: carbono sequestrado por quase 221,44 km² de florestas em um ano; emissões de CO₂ de 248 cargas de carvão queimados; assim como, emissões de CO₂ de 19.112.104,99 litros de gasolina consumidos. E são aproximadamente iguais aos seguintes benefícios energéticos por ano: potenciando cerca de 563 casas.

Deste modo, pode-se ressaltar que as reduções evitadas e reduzidas das emissões dos gases que agravam o efeito estufa (GEE) pela implantação do sistema, são formas de mitigar os eventuais impactos ambientais advindos da instalação e operação do aterro. Assim como, contribui para efetividade do principal objetivo estabelecido pelo Protocolo de Quioto, reduzir a emissão de GEE, aliviando os impactos causados pelo aquecimento global. Pois, projetos como este são essenciais para o desenvolvimento sustentável, ou seja, contribui para a redução ou substituição total dos combustíveis fósseis por fontes renováveis de energia.

Considerações finais

- Neste estudo, foi apresentado uma análise da viabilidade econômica do potencial energético para o aproveitamento do biogás no Aterro Sanitário de Anápolis, Goiás. A análise constituiu da possibilidade de aproveitar o gás de aterro, proveniente da degradação anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos, para geração de energia renovável.
- A implantação do sistema resultaria, além dos benefícios econômicos e energéticos, em benefícios ambientais, tais como a minimização dos impactos ocasionados pelas emissões dos gases de efeito estufa, dentre eles o metano e o dióxido de carbono, geração de empregos diretos, além de gerar energia própria capaz de auto sustentar o Aterro Sanitário.
- A projeção da geração de RSU no município de Anápolis, no cenário de 20 anos, resultou em um valor aproximando de 2.840.000 toneladas de resíduos coletados. Verifica-se a existência de um potencial muito grande para a utilização da área de disposição desses resíduos, o aterro sanitário municipal, para projetos de aproveitamento do biogás de forma energética. Em que, constatou-se pelos dados apresentados pelo programa LandGEM® da USEPA, a geração de mais de 161 milhões m³ de metano durante toda a vida útil do aterro.
- Os resultados do potencial energético mostraram que o aterro teria uma potência máxima de 1.800 kW no último ano de disposição dos resíduos. Verificou-se pelo

método escalonado uma potência ótima de 890 kW, para um grupo gerador a ser implantado no décimo ano, disponível durante 25 anos, que resultaria no aproveitamento de 7,8 GWh por ano e 202.706 GWh durante a vida útil do projeto, cerca de 41,9% da energia total disponível no aterro.

- Tendo em vista, verificou-se que o sistema apresentaria viabilidade técnico-econômica, existindo, assim, a possibilidade de implantação do mesmo no Aterro Sanitário de Anápolis-GO, obtendo-se resultados atraentes em dois cenários, com a venda no mercado de créditos de carbono e no Leilão da ANEEL. Para tal, foi considerado o sistema como de minigeração com compensação de energia elétrica, conforme a Resolução ANEEL nº 482/2012 alterada pela Resolução nº 687/2015, e a Norma Técnica da CELG D nº 71/2016.
- O sistema de compensação atuaria principalmente como fornecedor de energia elétrica para as unidades consumidoras presente no aterro, sendo estes o galpão de triagem da coleta seletiva, prédio da administração do aterro, guarita de pesagem dos caminhões de lixo, o sistema de iluminação do aterro, ou seja, todos de propriedade do poder públicos local presentes nas normalidades do Aterro Sanitário de Anápolis, que poderia resultar em um caixa para uso em possíveis ampliações do aterro, e principalmente investidos na melhoria da infraestrutura do aterro, como: asfaltamento da estrada de acesso.

Referências

- ABRACEEL, Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia. (2016). *Cartilha mercado livre de energia elétrica*. 9. https://www.abraceel.com.br/archives/files/Abraceel_Cartilha_MercadoLivre_V9.pdf
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. (2014). Caderno Temático ANEEL. *Micro e minigeração distribuído, sistema de compensação de energia elétrica*. <http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/caderno-tematico-microeminigeracao.pdf>
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. (2015). *Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015*. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. (2021). *Leilão nº1/2016-ANEEL* (Leilão A-

5). http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/editais/geracao/documentos/EDITAL_Leilão_A-5_2021.pdf

BANCO CENTRAL DO BRASIL. (2022a). *Calculadora do cidadão*. <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPUBLICO/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores>

BANCO CENTRAL DO BRASIL. (2022b). *Conversão de moedas*. <http://www4.bcb.gov.br/pec/conversao/conversao.asp>

Barros, R. M. (2012). *Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade*. Editora Interciência.

Bley Jr, C. (2012). O produto biogás: reflexões sobre sua economia. In W. M. Tavares (coord.) & A. P. Queiroz Filho. *Energias renováveis: riqueza sustentável ao alcance da sociedade*. 213-234.

http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/9229/energias_renovaveis.pdf?sequence=1

BRASIL. (2016). Ministério da Ciência e Tecnologia. *Arquivos dos fatores médios de emissão de CO2*. http://www.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/arquivos/emissoes_co2/03/Fatores-medios-de-emissao-de-CO2-grid-mes-ano.pdf

Brito Filho, L. F d. (2005). *Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos* [Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro]. http://www.coc.ufrj.br/es/component/docman/?task=doc_download&gid=1706&Itemid

Bueno, T. (2002, 3 Maio). Relação entre energia e desenvolvimento não é apenas questão econômica. *Aun – USP*. <http://www.usp.br/aun/antigo/exibir?id=293&ed=30&f=2>

CELG DISTRIBUIÇÃO S. A. (2016). Norma Técnica nº 71. <https://www.celg.com.br/arquivos/dadosTecnicos/normasTecnicas/NTC71.pdf>

CCEE, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. (2022). *Preços médios*. <https://www.ccee.org.br/web/guest/precos/painel-precos>

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2006). *Manual biogás - aterros* (versão 1.0). Ministério Brasileiro de Ciência e Tecnologia. <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/software/>

Colvero, D. A., & Souza, S. M de. (2016). Avaliação de riscos ocupacionais aos catadores de materiais recicláveis: estudo de caso no município de Anápolis, Goiás, Brasil. *Revista Tecnologia e Sociedade*, 12(26). <https://doi.org/10.3895/rts.v12n26.4518>

Conestoga-Rovers & Associates. (2004). *Manual para a preparação de projetos de gás de*

aterro sanitário para energia na América Latina e Caribe. Programa de assistência à gestão do setor energético. Banco Mundial. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/954761468011430611/pdf/332640handbook.pdf>

Costa, S., Barros, S. L. P., & Falcão, V. (2015). A utilização energética do biogás produzido em aterros sanitários. *Anuário de Produções Acadêmico-científicas dos discentes da Faculdade Araguaia*, 3(1), 326-332. <https://www.fara.edu.br/sipe/index.php/anuario/article/download/286/258>

Huang, W., Fooladi, H. (2021). Economic and environmental estimated assessment of power production from municipal solid waste using anaerobic digestion and landfill gas technologies. *Energy Reports*, 7, 4460-4469. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.036>

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010). *Dados da cidade de Anápolis – Goiás*. <http://cod.ibge.gov.br/5R1>

ICLEI - Brasil, Governos Locais pela Sustentabilidade. (2009). *Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários*. Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil. https://e-lib.iclei.org/wp-content/uploads/2018/10/Manual_para_aproveitamento_de_biog%C3%A1s_aterros2.pdf

INVESTING. (2022). *Crédito Carbono Futuros Dez 17 (CFI2Z7)*. <http://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Guia para inventários nacionais de gases de efeito estufa*. Módulo 6: Lixo. Volume 2. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs5.html>

Itagiba, A. C. (2018, 2 Maio). Aterro sanitário de Anápolis receberá lixo de três cidades vizinhas. *Jornal Estado de Goiás*. <https://www.jornalestadodegoias.com.br/2018/05/02/aterro-sanitario-de-anapolis-recebera-lixo-de-tres-cidades-vizinhas/>

Kanda, W., Zanatta, H., Magnusson, T., Hjelm, O., & Larsson, M. (2022). Policy coherence in a fragmented context: the case of biogas systems in Brazil. *Energy Research & Social Science*, 87, 102454. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102454>

Lee, U., Han, J., & Wang, M. (2017). Evaluation of landfill gas emissions from municipal solid waste landfills for the life-cycle analysis of waste-to-energy pathways. *Journal of Cleaner Production*, 166, 335-342. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.016>

Lima, F. R., Coitinho, V. T. D., & Da Silva, S. U. (2013). Relações de consumo x meio ambiente: o caminho para o desenvolvimento sustentável. In II Congresso Internacional de Direito Ambiental e Ecologia Política, IV Seminário Ecologia Política e Direito na América

- Latina. *Anais UFSM*. <http://coral.ufsm.br/gpds/anais/wp-content/uploads/2014/12/15.-RELA%C3%87%C3%95ES-DE-CONSUMO-X-MEIO-AMBIENTE.pdf>
- Lombardia, L., Corti, A., Carnevale, E., Baciocchi, R., & Zingaretti, D. (2011). Carbon dioxide removal and capture for landfill gas up-grading. *Energy Procedia*, 4, 465-472. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.01.076>
- Lopes, M. M. (2017). *Aproveitamento energético em aterros sanitários: análise da viabilidade técnica e econômica para o uso do biogás e instalação de painéis fotovoltaicos* [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá]. https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/862/dissertacao_lopes_2017.pdf?sequence=1
- Pawanant, K., & Leephakpreeda, T. (2017). Feasibility analysis of power generation from landfill gas by using internal combustion engine, organic Rankine cycle and Stirling engine of pilot experiments in Thailand. *Energy Procedia*, 138, 575-579. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.162>
- PREFEITURA DE ANÁPOLIS. (2015). *Plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos*. Secretaria Municipal de Meio Ambiente. <http://anapolis.go.gov.br/portal/arquivos/files/planoresiduossolidos.zip>
- Santos, I. F. S. dos. (2015). *Proposta de um método escalonado para a motorização do aproveitamento do biogás gerado por aterros sanitários para fins de geração de energia elétrica* [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá]. https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/162/dissertacao_santos2_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- SECIMA, Secretaria de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos. (2017). *Programa Goiás Solar*. <http://www.secima.go.gov.br/post/ver/219145/programa-goias-solar>
- U.S. BUREAU OF LABOR STATISTICS. (2022). *Cpi Inflation Calculator*. https://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm
- USEPA, United States Environmental Protection Agency. (2005). *Landfill Gas Emission Model Version 3.02* [Software de computador]. <https://www3.epa.gov/tncatc1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>
- USEPA, United States Environmental Protection Agency. (2021). *The Landfill Methane Outreach Program (LMOP)/LFGE Benefits Calculator* [Software de computador]. <https://www.epa.gov/lmop/landfill-gas-energy-benefits-calculator>