

## Geração de Energia Elétrica a Partir de Resíduos Sólidos no Aterro Sanitário de Foz Do Iguaçu

Adão Ednei Vieira\* Ali Mohamad Kanso\*\*  
Oswaldo Hideo Ando Junior\*\*\* Fernando Marcos de Oliveira\*\*\*\*  
Marcelo Henrique Manzke Brandt\*\*\*\*

\* *Companhia Paranaense de Energia, PR, (e-mail: vieiraednei@outlook.com)*

\*\* *Estudante de Engenharia Elétrica, Centro Universitário Dinâmica das Cataratas, PR (e-mail: ali.kanso.br22@gmail.com)*

\*\*\* *Professor da Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, PE (e-mail: eng.oswaldo@gmail.com)*

\*\*\*\* *Professores de Engenharia Elétrica, Centro Universitário Dinâmica das Cataratas - UDC, PR (e-mail: fernando.oliveira@udc.edu.br e marcelo.b@udc.edu.br)*

---

**Abstract:** The intensity of waste generation has become one of the biggest problems in today's society, as it is a virtually impossible problem to be eliminated, where one of the possible solutions would be to take advantage of the benefits that waste can bring, which is the generation of electric energy through the use of biogas generated in landfills. Thus, this theme was thought to provide a general understanding of landfill, solid waste, biogas production and the electric energy generation through the use of biogas. In order to take advantage of this generation potential, it will be important to identify ways of treating waste, mechanisms for obtaining biogas and converting biogas into electrical energy. Aiming to study the potential of energy generation from waste from a sanitary landfill in Foz do Iguaçu/PR, aiming to develop the use of biogas as an alternative source of renewable energy and to estimate the potential for generating electricity derived from methane gas from waste of landfill. With the calculation of the estimate of biogas generation, it was possible to verify that the sanitary landfill of Foz do Iguaçu has an average production capacity to generate enough biogas to feed approximately 964 homes by the year 2030.

**Resumo:** A intensidade da geração de resíduos tornou-se um dos maiores problemas da sociedade atual, pois é um problema praticamente impossível de ser eliminado, onde uma das soluções possíveis seria aproveitar os benefícios que os resíduos podem trazer, como por exemplo, a geração de energia elétrica através do uso do biogás gerado em aterros sanitários. Assim, o tema proposto neste trabalho foi pensado para proporcionar uma compreensão geral sobre aterro sanitário, resíduos sólidos, produção de biogás e a geração de energia elétrica através do uso do biogás. Para conseguir aproveitar esse potencial de geração, será importante identificar as formas de tratamento de resíduos, mecanismos de obtenção de biogás e a forma de conversão do biogás em energia elétrica. Com o objetivo de estudar o potencial de geração de energia a partir de resíduos de aterro sanitário de Foz do Iguaçu/PR, visando desenvolver o uso do biogás como fonte alternativa de energia renovável e estimar o potencial de geração de energia elétrica derivada do gás metano proveniente de resíduos de aterro. Com o cálculo da estimativa de geração de biogás, foi possível verificar que o aterro sanitário de Foz do Iguaçu possui capacidade média de produção para geração de biogás o suficiente para alimentar aproximadamente 964 residências até o ano de 2030.

**Keywords:** Biogas; Energetic Harnessing; Landfill; Renewable Energy; Solid Waste.

**Palavras-chaves:** Biogás; Aproveitamento Energético; Aterro; Energia Renovável; Resíduos Sólidos.

## 1. INTRODUÇÃO

No cenário atual, com o crescimento populacional se intensificando, a geração de resíduos sólidos urbanos foi tornando-se um fator cada vez mais relevante e preocupante, onde diversas soluções começaram a ser desenvolvidas a fim de gerenciar adequadamente a estes resíduos sem trazer consequências ambientais. O foco no tratamento destes resíduos é atualmente direcionado na extração de biogás para implementação na geração de biocombustível (biometano), energia térmica e energia elétrica. Neste artigo o enfoque estará voltado na geração de energia elétrica.

Atualmente, o aproveitamento de biogás dos resíduos sólidos urbanos ocorre em aterros sanitários, onde o gás formado nestes ambientes é composto por vários elementos, a maior parte sendo o metano e dióxido de carbono e parcelas menores de amônia, hidrogênio, sulfeto de hidrogênio, nitrogênio e oxigênio. A mistura destes gases é chamada de biogás.

De acordo com Piñas et al. (2016) a distribuição exata do percentual da composição do biogás variará conforme o tipo de matéria orgânica a ser decomposta e o tempo de existência do aterro.

Neste artigo será avaliado o potencial energético do biogás produzido no aterro sanitário do município de Foz do Iguaçu, a fim de estudar a viabilidade energética da geração de energia elétrica para atender as unidades do aterro e o fornecimento do excedente para a concessionária de energia local.

## 2. DESENVOLVIMENTO

Para conseguir compreender o potencial de produção de biogás a partir dos resíduos sólidos urbanos do município de Foz do Iguaçu, será necessário compreender um pouco mais do processo de geração desse biogás. Dessa forma, a seguir serão apresentados os conceitos envolvendo ao processo de biodigestão, sobre o tratamento de resíduos sólidos, a forma de captar o biogás gerado no aterro e por fim as formas de aproveitamento desse biogás.

### 2.1 Biodigestão Anaeróbica

A biodigestão anaeróbica é um processo natural onde resíduos orgânicos são digeridos por colônias de bactérias na ausência de ar, após a biodigestão do substrato surgem dois produtos extremamente úteis, o biogás (empregado na geração de eletricidade, biocombustível e calor) e o digestato (fertilizante natural rico em nitrogênio, fósforo e potássio).

Para a produção de biogás a matéria orgânica deve passar por quatro estágios, onde cada fase do processo é realizada por uma colônia de bactérias, as etapas da biodigestão são conhecidas como: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. É importante esclarecer que os processos que caracterizam a biodigestão ocorrem de maneira simultânea (Rohstoffe, 2010).

No entanto, apesar desta simultaneidade entre os processos, cada colônia de bactérias possui suas exigências específicas em relação ao habitat para que o desenvolvimento dos microorganismos ocorra. Desta forma, deve ser definido um meio termo em relação à tecnologia do processo. Quanto a estas exigências bacteriológicas, podem ser citadas a temperatura, o pH, o nível de oxigênio e hidrogênio, a falta de controle destes parâmetros resulta na redução do potencial energético do biogás e até mesmo descontinuidade da biodigestão.

Como os microrganismos metanogênicos são o elo mais fraco da biocenose e os mais sensíveis a distúrbios, em virtude de sua baixa taxa de crescimento, as condições do meio têm de ser adaptadas às suas necessidades (Rohstoffe, 2010).

No que refere-se a primeira etapa da biodigestão, bactérias hidrolíticas atuam na hidrólise realizando a decomposição de compostos complexos como proteínas, carboidratos e lipídios em substâncias menos complexas como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos. Este processo ocorre através da liberação de enzimas pelas bactérias hidrolíticas que decompõem o material por meio de reações químicas.

Na fase da acidogênese, as bactérias acidogênicas realizam a decomposição das substâncias formadas na etapa hidrolítica, formando então os ácidos graxos de cadeia curta, dióxido de carbono e hidrogênio. Adicionalmente, formam-se pequenas quantidades de ácido lático e álcoois. A porcentagem da composição das substâncias formadas nesta etapa depende da concentração de hidrogênio intermediário (Rohstoffe, 2010).

Na acetogênese, ocorre o processo de formação de ácido acético, esses compostos são convertidos por bactérias acetogênicas em precursores do biogás. Se este processo não for devidamente controlado e o pH reduzir-se para abaixo de 4 todo o processo será cessado devido ao teor ácido do substrato, conforme menciona (Pullen, 2015).

No último estágio da biodigestão ocorre a metanogênese realizada pelas arqueas metanogênicas pelo consumo de ácido acético, hidrogênio e o dióxido de carbono e gerando o gás metano.

### 2.2 Resíduos Sólidos Urbanos

De acordo com a Lei nº 12.305, de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), no Art.3º, parágrafo XVI, define Resíduos Sólidos como material, substância, objeto ou bem descartado de resultado de atividades humanas em sociedade, cuja a destinação final se procede, nos estados sólidos ou semissólido, bem como os gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos e que exijam soluções técnicas ou economicamente viáveis em face da melhor tecnologia disponível (Brasil, 2010).

O crescente aumento da produção destes resíduos sólidos desencadeado pelo aumento populacional ao longo dos anos se tornou uma problemática a ser discutida e requer uma solução adequada para o gerenciamento da disposição

e tratamento destes resíduos a fim de reduzir os impactos que estes causam devido à contaminação do solo, dos lençóis freáticos e da liberação de gases do efeito estufa. No Brasil, o gerenciamento e coleta dos RSU são de inteira responsabilidade de prefeituras, ademais, são obrigadas a possuir área adequada para disposição destes resíduos (Bidone, 2001).

### 2.3 Disposição dos Resíduos Sólidos

Em aterros sanitários ocorre a disposição e tratamento dos RSU, onde são extraídos recursos dos materiais não orgânicos através da reciclagem. Já os resíduos orgânicos são submetidos a processos de extração de biogás para aproveitamento.

Devido a presença de gás metano, o biogás não pode ser emitido para a atmosfera sem que ocorra o devido aproveitamento deste composto. A liberação de metano na atmosfera intensifica a problemática referente ao aquecimento global, isto porque, de acordo com Piñas et al. (2016), o metano é cerca de 21 vezes mais poluente à camada de ozônio se comparado ao gás carbônico.

Análises econômicas são necessárias para estudar a viabilidade financeira de empreendimentos energéticos em aterros sanitários a fim de utilizar o metano para geração de eletricidade, calor ou biocombustível.

É correto considerar que um aterro sanitário é um reator biológico a céu aberto. Neste meio de disposição de resíduos predomina a biorredução anaeróbica, entretanto também ocorre a digestão aeróbia dos RSU, com presença de oxigênio, durante um pequeno período de tempo quando ocorre a deposição dos resíduos no aterro.

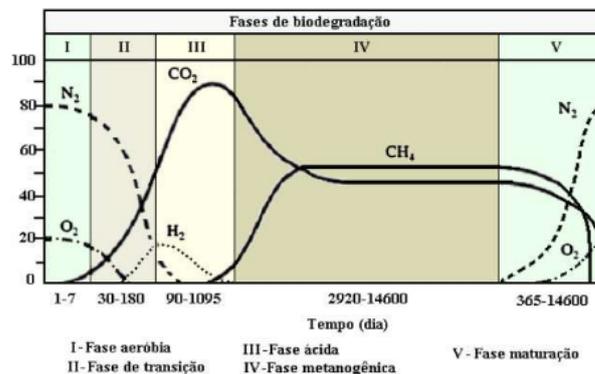
Desta forma, de acordo com Silva and Mota (2019), os micro-organismos degradadores da matéria orgânica podem ser classificados em: aeróbios (necessitam de oxigênio para a biorredução), anaeróbios (realizam a degradação da matéria orgânica sem a presença de oxigênio) e aeróbios facultativos (realizam a biodigestão com ou sem a presença de oxigênio).

### 2.4 Fases da Degradação dos RSU em Aterros Sanitários.

O processo de degradação do RSU possui cinco fases, em cada momento com características específicas de transformação. Dessa forma na Figura 1 e logo após ela, são apresentadas essas etapas.

- Fase I: Na fase inicial, logo que o resíduo é disposto, ocorre o consumo de oxigênio presente no interior da célula, resultando na produção de  $CO_2$ , verificado através do aumento da temperatura nos primeiros dias de aterramento.
- Fase II: Início da fase de transição, onde inicia-se a formação de chorume e o oxigênio é completamente consumido, desta forma, a partir desta fase começa a biorredução anaeróbica e o pH do chorume começa a decair, ocorrendo o aumento na produção de gás carbônico.
- Fase III: Fase de formação ácida e de maior concentração de  $CO_2$  e estão presentes colônias de bactérias anaeróbicas e facultativas. A partir desta etapa ocorre

Figura 1. Fases da Degradação dos RSU em Aterros Sanitários.



Fonte: Adaptado de Alcântara (2007).

em predominância a formação de ácidos orgânicos voláteis devido à hidrólise nos estágios iniciais da decomposição e da fermentação dos resíduos e consequente diminuição do pH. Ademais, ocorre o aumento da parcela de nutrientes como fósforo e nitrogênio, que são consumidos no crescimento da biomassa. Maior presença de gás hidrogênio.

- Fase IV: Início da fase anaeróbica metanogênica, predominam colônias de bactérias estritamente anaeróbicas atuantes na conversão de ácido acético e gás hidrogênio em gás carbônico e metano em respectivas proporções de 35-50% e de 45-60%, como menciona (Silva and Mota, 2019).
- Fase V: Decaimento da produção de gás, presença limitada de nutrientes, aumento no potencial de oxirredução devido à presença de espécies oxidantes. Diminuição drástica na geração de metano e gás carbônico. Nesta fase ocorre a presença de ácidos húmicos e fúlvicos no chorume. Atuam na fase metanogênica as bactérias mesófilas com atividade na faixa de 30°C a 35°C, e as bactérias termófilas com atividade na faixa dos 45°C a 65°C.

Segundo Silva and Mota (2019) e Rohstoffe (2010), a variação na composição do biogás é influenciada de acordo com a variação de alguns parâmetros, tais como: poder calorífico do substrato; propriedades físicas dos RSU; temperatura; presença de oxigênio; e valor de pH.

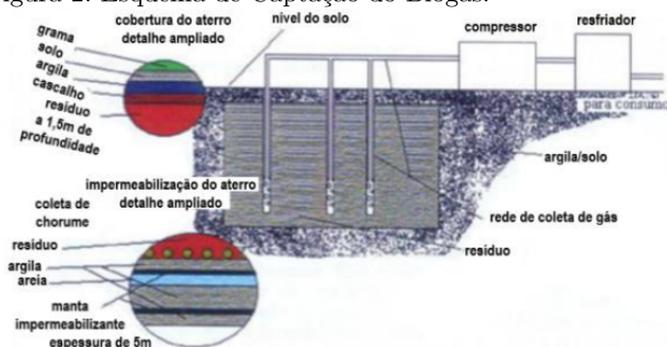
Demais fatores que influenciam na geração de biogás podem estar associados a: geometria e operação do aterro sanitário, características iniciais dos resíduos e do ambiente interno e externo à célula.

A interação entre estes aspectos físicos, químicos e biológicos são de grande importância para a definição das diferentes fases de decomposição dos resíduos orgânicos, do potencial energético e volume de biogás gerado.

### 2.5 Captação de Biogás em Aterros Sanitários

Uma das formas mais simples de se coletar os gases do aterro é por meio de uma rede de tubos verticais perfurados. Já os tubos de sucção horizontais são instalados enquanto o resíduo ainda está sendo depositado no aterro, possibilitando que a coleta do biogás seja iniciada desde o início da sua produção.

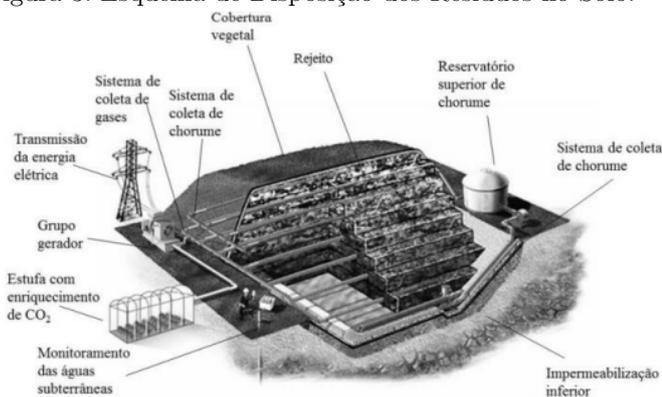
Figura 2. Esquema de Captação do Biogás.



Fonte: Alves (2000).

As Figuras 2 e 3 ilustram um aterro sanitário com recuperação do biogás através de geração de energia elétrica e aproveitamento do  $CO_2$ . O corte vertical permite a visão das camadas de rejeito e do sistema de drenagem de chorume, um dos grandes problemas enfrentado pelos aterros sanitários.

Figura 3. Esquema de Disposição dos Resíduos no Solo.



Fonte: Alves (2017).

Normalmente a captação de gás começa efetivamente após uma camada do aterro ser fechada por terra ou pelos próprios resíduos, onde uma das pontas do tubo é conectada a uma tubulação lateral que transporta o gás para um coletor principal. O biogás é absorvido do aterro por meio de pressão negativa nos tubos de transmissão.

### 2.6 Aproveitamento Energético do Biogás

Devido o constante aumento na demanda de energia elétrica, e com o objetivo de reduzir a utilização de máquinas térmicas durante os períodos de escassez hídrica nas hidrelétricas, é viável o recorrente ao uso de plantas de biogás, que além de serem uma excelente alternativa para produção de energia, não emitem poluição.

Atualmente, a geração de energia em aterros sanitários a partir do biogás é algo concreto em várias partes do mundo (EUA, Inglaterra, Dinamarca, Itália, etc.) e uma tendência para os países em desenvolvimento, como o Brasil, por configurar-se num tipo de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

A energia elétrica gerada a partir do biogás pode ser consumida pelo próprio aterro ou, em caso de excedentes

de energia, pode ser comercializada, proporcionando uma receita adicional ao aterro.

É fato que o principal consumo energético brasileiro provém de fontes hídricas em aproximadamente 70%. A utilização de biomassa contribui com cerca de 29,7% para a geração de energia, a expectativa é de crescimento para utilização deste recurso.

### 2.7 Geração de Energia Elétrica

A conversão energética de um combustível consiste na transformação de um tipo de energia em outro, onde a conversão energética do biogás envolverá tecnologias para converter a energia química do biogás, por meio de uma combustão controlada do metano, em energia térmica podendo ser utilizado diretamente com a cogeração ou então convertida em energia cinética e energia elétrica.

As tecnologias convencionais para a transformação energética do biogás são as turbinas a gás e os motores de combustão interna. Existem também tecnologias emergentes como as células de combustíveis que, ainda estão em etapa de desenvolvimento e aperfeiçoamento, pode ser considerada uma tecnologia promissora.

De acordo com Coelho et al. (2006), uma das opções mais utilizadas para a geração de energia elétrica utilizando o biogás como fonte de energia, são os motores a combustão interna, que apresentam uma capacidade de geração de energia elétrica entre aproximadamente 100 kW a 3 MW por motor.

O rendimento médio para geração de energia elétrica é de 6,5 kWh para cada  $m^3$  de biogás, isso com 100% de eficiência na conversão.

## 3. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo desenvolvido neste artigo teve como objetivo o dimensionamento de uma planta de biogás a partir da geração de biogás proveniente de RSU contidos no aterro sanitário de Foz do Iguaçu.

Com finalidade exploratória, serão observados aspectos de viabilidade econômica e energética do aproveitamento de biogás gerados neste aterro.

### 3.1 Panorama do Aterro Sanitário de Foz do Iguaçu

Atualmente o aterro sanitário consta com células isoladas entre si onde os resíduos são compostos em camadas de aproximadamente 6 m de altura. O aterro ocupa uma área de 389.737,44  $m^2$ , onde desenvolvem-se atividades de tratamento dos resíduos dispostos.

A Figura 4 mostra a divisão existente no aterro sanitário de Foz do Iguaçu, as células 1 e 2 são compostas por 6 camadas cada e tem uma área de 58.387,15  $m^2$  e 61.584,01  $m^2$ , a célula 1 teve seu período depósito de resíduos de 2001 a 2010, a célula 2 funcionou de 2010 a 2017 e a célula 3 iniciou sua atividade em julho de 2017 e possui uma área de 64.780,63  $m^2$ .

Na área 4 e 5 ilustradas ocorrem a compostagem dos resíduos e o tratamento de chorume, respectivamente.

Figura 4. Vista Panorâmica e Superior do Aterro Sanitário de Foz do Iguaçu.



Fonte: Adaptado do Google Earth, 2020.

De acordo com PMFI (2012), o gráfico da Figura 5 representa o histórico de armazenamento de resíduos sólidos para o aterro estudado, as informações sobre a quantidade de armazenamento foram obtidas com a empresa que administra o aterro sanitário de Foz do Iguaçu.

Figura 5. Registro de Disposição de RSU no Aterro Sanitário de Foz do Iguaçu.



Fonte: Adaptado de PMFI (2012)

### 3.2 Cálculo da Emissão de Metano do Aterro Sanitário de Foz do Iguaçu

Para o correto dimensionamento do potencial energético do metano presente no biogás proveniente dos RSU, empregam-se métodos para o cálculo de emissão de metano pelo aterro. O método foi elaborado por Change (1996) e encontra-se no manual do painel internacional de mudanças climáticas (IPCC da sigla em inglês *International Panel on Climate Change*).

Através deste método a estimativa de carbono orgânico degradável presente no aterro é calculada, assim, a quantificação do metano a ser degradado pode ser determinada

A equação é descrita como sendo:

$$Q_{(CH_4)_i} = K \cdot L_0 \cdot m_i \cdot e^{-k \cdot t} \quad (1)$$

Onde:

- $Q_{(CH_4)_i}$  = Metano produzido no ano i a partir da seção i do resíduo ( $m^3$ /ano);
- K = Taxa de geração de metano ( $ano^{-1}$ );
- $L_0$  = Potencial da geração de metano ( $m^3 CH_4$ /tonelada de resíduos);
- $m_i$  = Massa de resíduo despejada no ano i (tonelada/ano);
- t = Anos após o fechamento do aterro.

O potencial de geração de metano dos resíduos ( $L_0$ ) é calculado através da seguinte fórmula:

$$L_0 = FCM \cdot COD \cdot CODf \cdot F \cdot \frac{16}{12} \quad (2)$$

Onde:

- $L_0$  = Potencial de geração de metano do resíduo ( $m^3$  biogás/kg RSU);
- FCM = Fator de correção de metano = 1 (para aterro bem gerenciado);
- COD = Carbono orgânico degradável, dado em tonelada de C/ton. de resíduo;
- CODf = Fração do COD que pode se decompor = 0,50 (sugestão do IPCC, 2006);
- F = Fração do metano presente no biogás em volume;
- $\frac{16}{12}$  = Fator de conversão do carbono em metano, dado em tonelada de  $CH_4$ /tonelada de C.

O Fator de Correção do Metano (FCM) vai variar de acordo com a qualidade da compactação dos resíduos, pois esse fator leva em consideração a maneira como os resíduos são depositados, porque isso influenciará na geração de metano do aterro sanitário.

E de acordo com o Change (1996) o FCM pode ser conforme a Tabela 1:

Tabela 1. Fator de Correção do Metano

Valor do fator de correção do $CH_4$	Situação do aterro sanitário
0,4	Lugares de deposição inadequados e com profundidades de lixo menores que 5 m.
0,8	Lugares de deposição inadequados, porém, com profundidades de lixo maiores que 5 m.
1,0	Locais adequados, com deposição controlada de lixo, material de cobertura, compactação mecânica e nivelamento do terreno.

Fonte: Change (1996).

O valor de F, que representa a fração de metano que está presente no biogás varia nos aterros sanitários, o percentual de metano em sua composição fica entre 35 e 65%.

O COD é a quantidade de carbono degradável presente nos resíduos que será levada em conta para composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos. A quantidade de carbono presente em cada componente dos resíduos pode ter grandes variações de um lugar para outro, os valores para o COD podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2. Teor de COD presente nos resíduos

Componente	COD (em relação a massa)
A - Papel e papelão	40%
B - Resíduos de parques e jardins	17%
C - Resto de alimentos	15%
D - Tecidos	40%
E - Madeira	30%

Fonte: Brito (2006).

Assim, o COD pode ser calculado da seguinte maneira:

$$COD = 0,4 \cdot A + 0,17 \cdot B + 0,15 \cdot C + 0,4 \cdot D + 0,3 \cdot E \quad (3)$$

Onde os índices A, B, C, D e E referem-se às frações dos componentes principais encontrados em uma série de amostras de resíduo. Os valores multiplicadores são os índices de carbono degradável para cada material, conforme a Tabela 2.

O parâmetro CODf é a fração dissociada de carbono orgânico degradável que se decompõem sob condições anaeróbias, é a fração de carbono que é disponível para a

decomposição bioquímica e varia em função da temperatura na zona anaeróbia do aterro sanitário, por isso assume-se que a temperatura na zona anaeróbia de um local de disposição de resíduos sólidos seja em média dos 35°C independentemente da temperatura ambiente. Dessa forma, o CODf pode ser calculado conforme a equação abaixo:

$$CODf = 0,014 \cdot T + 0,28 \quad (4)$$

Na Tabela 3 estão contidas as informações percentuais dos componentes presentes nos RSU, pois a geração de metano é calculada separadamente para cada montante dessas classes.

Tabela 3. Teor de carbono orgânico degradável presente nos resíduos

Componente RSU	RSU no aterro de Foz do Iguaçu	Objetos
Papel/Papelão	5,26%	Caixa, jornal, cartões, papel, revistas, livros, pratos, caderno.
Matéria Orgânica	57,35%	Resto de alimentos, podas de árvores, flores.
Metal	1,92%	Fiação elétrica, agulha, palha de aço.
Plástico	9,52%	Sacolas, saco de lixo etc.
Vidro	3,72%	Garrafas, lâmpadas e copos quebrados.
Diversos	22,24%	Cera de vela, restos de sabão e sabonete, carvão, giz, pontas de cigarro, cartão de crédito, lápis de cera, embalagem longa vida, e outros materiais não identificados

Fonte: Adaptado de PMFI (2012).

#### 4. CÁLCULOS DE DIMENSIONAMENTO

A seguir serão demonstrados os passos descritos para o cálculo do carbono degradável dos resíduos no aterro, onde foi utilizado o estudo realizado pela prefeitura no Plano Municipal de saneamento Básico do município (2012), que realizou a análise gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do aterro sanitário de Foz do Iguaçu – PR, onde os resíduos foram classificados por matéria orgânica, papel/papelão, metal, plástico, vidro, conforme a Tabela 3.

Dos materiais descritos, os papeis e papelões se enquadraram como componente A e a matéria orgânica foi considerada como componente B e os outros componentes não foram representados nos cálculos devido o aterro possuir coleta seletiva.

Assim, com os dados obtidos referente ao aterro sanitário de Foz do Iguaçu, é possível calcular o COD.

$$COD = (0,0526 \cdot 0,40) + (0,5735 \cdot 0,15) = 0,1071 \quad (5)$$

E também é possível calcular a CODf, para o cálculo de CODf considera-se a temperatura de 35°C, já que pode se assumir que a temperatura na zona anaeróbia de um local de disposição de resíduos sólidos permanece por volta dos 35°C. Sendo assim o valor de CODf fica:

$$CODf = (0,014 \cdot 35) + 0,28 = 0,77 \quad (6)$$

#### 4.1 Cálculo do potencial de geração de metano dos resíduos ( $L_0$ )

Com os valores de COD e CODf, utilizando a equação 2, podemos calcular o potencial de geração de metano que terá no aterro de Foz do Iguaçu.

$$L_0 = 1 \cdot 0,1071 \cdot 0,77 \cdot 0,5 \cdot \frac{16}{12} \quad (7)$$

$L_0 = 0,0550$  toneladas  $CH_4$  por tonelada de RSU;

$L_0 = 0,0550$  toneladas de  $CH_4$  por tonelada de RSU por 0,0007168 toneladas por  $m^3$ ;

$L_0 = 76,73m^3$  de  $CH_4$  por tonelada de resíduo;

#### 4.2 Estimativa de Produção de Metano no Aterro Sanitário de Foz do Iguaçu

A partir da metodologia de cálculo apresentada, calculou-se a estimativa de produção de metano nas células do aterro sanitário com base na informação dos resíduos depositados para um período de aproximadamente 22 anos (2001 até 2023). Tal estimativa levou em consideração a condição de uma estimativa de crescimento populacional do município e da quantidade de cargas que poderão ser atendidas.

A quantidade estimada de metano gerado pelas células estão na tabela da Tabela 4

Tabela 4. Estimativa de produção de metano aterro sanitário Foz do Iguaçu

Célula 1		Célula 2		Célula 3	
Ano	$m^3$ /dia	Ano	$m^3$ /dia	Ano	$m^3$ /dia
2001	348,11	2010	608,36	2017	742,49
2002	682,00	2011	1193,12	2018	1456,22
2003	1002,44	2012	1755,51	2019	2142,63
2004	1310,08	2013	2296,68	2020	2803,12
2005	1605,56	2014	2817,73	2021	3439,07
2006	1889,51	2015	3319,70	2022	4051,73
2007	2162,49	2016	3803,56	2023	4642,30
2008	2425,10	2017	4270,30	2024	5211,95
2009	2677,84	2018	4062,03	2025	5761,78
2010	2547,23	2019	3863,92	2026	6292,85
2011	2423,23	2020	3675,48	2027	6806,11
2012	2304,82	2021	3496,22	2028	7302,58
2013	2192,44	2022	3325,70	2029	7783,07
2014	2085,51	2023	3163,51	2030	8248,52
2015	1983,78	2024	3009,23	2031	8746,25
2016	1887,04	2025	2862,47	2032	9263,59
2017	1795,01	2026	2722,85	2033	9799,59
2018	1707,45	2027	2590,05	2034	10353,32
2019	1624,19	2028	2463,75	2035	10923,97
2020	1544,99	2029	2343,59	2036	11510,66
2021	1469,62	2030	2229,29	2037	12112,63
2022	1397,95	2031	2120,58	2038	12729,15
2023	1329,78	2032	2017,15	2039	13360,51
<b>Média</b>	<b>1756,35</b>	<b>Média</b>	<b>2783,08</b>	<b>Média</b>	<b>5434,05</b>

Fonte: Vieira (2020)

Ao analisar a Tabela 4, é possível concluir que a geração de energia elétrica proveniente da liberação de metano dos RSU tornou-se viável a partir do terceiro ano de funcionamento da célula 1, atingindo uma produção média de metano de 1002,33  $m^3$ /dia. A previsão é que a célula 1 permaneça em operação até 2023, com produção média de metano atingindo cerca de 1756,35  $m^3$ /dia.

Em 2010 iniciaram-se as operações da célula 2, que no segundo ano de funcionamento apresentou uma média de 1193,12 m<sup>3</sup>/dia de metano produzido. Estima-se que o funcionamento da célula 2 perdure até meados de 2032, totalizando cerca de 2783,08 m<sup>3</sup>/dia de produção de metano durante seu período de funcionamento.

A célula 3 iniciou suas operações em 2017, atingindo valores favoráveis de produção de metano em 2018 com cerca de 1456,22 m<sup>3</sup>/dia. Até o momento, a célula 3 é a que apresenta maiores valores médios de produção de metano diário. A previsão para o encerramento das atividades na célula estão previstas para ocorrerem em 2039, resultando num valor médio de 5434,05 m<sup>3</sup>/dia durante a vida útil da célula.

É correto afirmar que o pico de produção de metano observado em cada célula provém da fase de maturação dos resíduos orgânicos do aterro, nesta fase a biodegradação atinge seu máximo potencial e posteriormente a estabilização dos RSU, consequentemente a geração entra em queda acentuada até cessar a produção de gás.

Outro ponto importante de salientar é a produção média de biogás para o ano de 2020, juntando as três células produzem 8023,59 m<sup>3</sup>/dia. Para sabermos quantos de biogás teremos por hora, basta dividirmos esse valor por 24h, o que resulta em 334,32 m<sup>3</sup>/h. Essa conta pode ser aplicada para qualquer ano exposto na Tabela 4 para qualquer um dos valores de biogás gerador por dia.

Em 2015, a empresa CIBIOGÁS juntamente com Sbalqueiro (2014) realizaram um estudo no aterro sanitário de Foz do Iguaçu com a finalidade de obtenção do potencial térmico do gás, características da composição dos substratos e a vazão volumétrica do biogás. Em relação à composição química do biogás, obteve-se 57% de CH<sub>4</sub>, 42% de CO<sub>2</sub> e 50ppm de H<sub>2</sub>S.

Com base nos dados foi possível calcular as propriedades do biogás encontrado no aterro, seguindo a NBR 15213 e os valores podem ser vistos na Tabela 5. O cálculo foi baseado na temperatura de 20 °C:

Tabela 5. Potencial térmico do gás

Valores calculados com base nos dados obtidos	
Índice de Wobbe	21,7658 MJ/m <sup>3</sup>
PCI (Poder Calorífico Inferior)	19,2707 MJ/m <sup>3</sup>
PCS (Poder Calorífico Superior)	21,384 MJ/m <sup>3</sup>
Densidade absoluta	1,1638 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Sbalqueiro (2014).

#### 4.3 Modelo de Planta para Análise

Para gerar energia elétrica no aterro sanitário foi proposta a utilização de grupo de motor gerador de combustão interna operando via ciclo Otto.

Essa escolha se fez devido ao destaque em relação na avaliação de consumo de combustível e uma facilidade de implantação. Conforme a tabela da Figura 6.

O ciclo Otto opera em um ciclo de trabalho de 4 tempos em que no primeiro tempo conhecido como Admissão, ocorre a entrada da mistura ar/gás de aterro no cilindro através da válvula de admissão.

Tabela 6. Parâmetros das fontes de geração

Parâmetros	GMG	Turbina e Microturbina a gás
Eficiência elétrica	33%	28%
Consumo de combustível	10972,0 kJ/kWh	12872,0 kJ/kWh
Emissão de NOx	56,6 µg/kJ	15 µg/kJ
Emissão de CO	56,6 µg/kJ	19µg/kJ

Fonte: Bove and Lunghi (2006).

Segundo Neto (2012) e Turns (2013), nesta fase inicial, determina-se as proporções de ar e gás de aterro admitidos no cilindro através da relação de equivalência  $\Phi$ , frequentemente usada para indicar quantitativamente quando uma mistura de oxidante e combustível é rica, pobre ou estequiométrica.

Considera-se para misturas ricas em combustível  $\Phi > 1$ , para misturas pobres em combustível  $\Phi < 1$  e para mistura estequiométrica  $\Phi = 1$ .

No segundo tempo ocorre a compressão e nesta fase, as válvulas de admissão irão se fechar e os pistões sairão do ponto morto inferior e passando a se mover para cima, em direção ao ponto morto superior, ocorrendo assim o processo de compressão da mistura.

No terceiro tempo ocorre a combustão ou também conhecido como fase de ignição, fase esta considerada a mais importante do ciclo, onde ocorre a queima do combustível e a geração da propulsão do motor, por combustão espontânea gerada pela compressão.

No quarto tempo conhecido como escape é a última fase do ciclo e também conhecida como exaustão, essa fase ocorre a expulsão dos gases de escape gerados pela queima do combustível para fora da câmara com a subida dos pistões, e respectivamente à abertura das válvulas de escape.

#### 4.4 Especificação do Grupo Motor-Gerador (GMG)

Os motores e os geradores utilizados para conversão do biogás em energia elétrica são encontrados em pequena ou grande escala de produção, já na média produção algumas empresas realizam adaptação em motores à gasolina ou diesel para trabalhar com o biogás (Schmoeller, 2019).

Para o estudo de caso será utilizado um grupo gerador a biogás da empresa Biogás Motores Estacionários LTDA. A marca e o modelo mencionado neste trabalho é apenas para descrever com maiores detalhes o sistema de geração, maiores informações sobre o modelo podem ser vistas em (Biogás, 2021).

Algumas informações são extremamente relevantes para o dimensionamento do sistema, como por exemplo as características do conjunto do Motor-Gerador à biogás que será utilizado. Assim, as informações mais importantes do GMG podem ser vistas na Tabela 7.

Através dos dados de emissão de metano das células do aterro sanitário, é correto afirmar que a partir do oitavo ano do funcionamento da célula 1 (2008), a vazão de gás já atingia valores médios de 100 m<sup>3</sup>/h, se considerando hoje a vazão de metano das três células simultaneamente a vazão alcança aproximadamente 334,32 m<sup>3</sup>/h, mais do que o suficiente para a alimentação de 3 grupos de motores em regime de operação de 24 horas por dia.

Tabela 7. Detalhes Técnicos - GMG

Grupo gerador a Biogás GGB 200				
Emergência	Principal	Contínua	Motor	
			Marca	Modelo
kVA	kVA	kVA		
200	180	160	MWM	6.12TCEG-G2
Dimensões A x L x C (mm):			1500 x 960 x 2000	
Consumo de biogás modo contínuo:			72 m <sup>3</sup> /h por GMG	
Fonte: Biogás (2021)				

Conforme os dados da Tabela 7, o gerador operando durante 24 horas (de maneira contínua) por dia possui uma potência de 160 kVA e um fator de potência de 0,8. Calculando sua potência ativa, obtêm-se 128 kW para cada uma das máquinas. Entretanto, sabe-se que deverão ser realizadas manutenções das máquinas elétricas, estima-se que o tempo de inatividade de cada motor alcançará aproximadamente 10% durante estas 24 horas, ou seja, 21,6 horas será o tempo médio de trabalho deste gerador.

Desta forma, sabendo que cada gerador possui uma potência ativa de 128 kW trabalhando 21 horas média durante os 30 dias do mês, cada gerador irá gerar 80,31 MWh/mês e na utilização dos 3 GMGs a geração terá uma média de 241 MWh/mês. Segundo a Companhia Elétrica Paraná o consumo médio de energia de uma residência é aproximadamente 250 kWh/mês no ano de 2019, e com a geração de 241 MWh/mês de energia por mês do aterro sanitário seria possível alimentar uma média de 964 residências por mês enquanto o aterro de Foz estiver gerando o biogás.

## 5. CONCLUSÃO

Utilizando a estimativa obtida pelo método desenvolvido pelo Change (1996) foi possível concluir que o aterro sanitário de Foz do Iguaçu possui uma capacidade média de produção de geração de biogás de 3324,49 m<sup>3</sup>/dia até o ano de 2039.

Também foi possível verificar que na célula 1 o pico de maior produção de biogás foi no ano de 2009 e da célula 2 foi no ano de 2017 e para célula 3 estima-se que o pico de maior produção seja no ano de 2030. Mesmo após o pico da célula 1 e 2 já terem passado a produção de biogás ainda pode ser considerável para essas células, considerando a produção de biogás de 2020 e canalizar toda a produção das 3 células o aterro produziria aproximadamente 334,31 m<sup>3</sup>/h de biogás.

Esse total de biogás gerado, tem a capacidade de alimentar 3 GMGs com uma média de consumo de 72 m<sup>3</sup>/h cada. E assim, conseguirá uma média de geração de 241 MWh/mês que terá a capacidade de alimentar uma média de 964 residências que possuem um consumo médio mensal de 250 kWh/mês.

Dentre as tecnologias de conversão do potencial térmico do biogás em energia elétrica escolheu-se usar a do ciclo Otto ou motogerador por ser uma tecnologia já firmada no mercado e com um custo benefício de implantação bem estabelecidos. Sendo a sua operação e manutenção bastante conhecidos

## REFERÊNCIAS

Alcântra, P.B. (2007). Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados.

- Alves, J.W.S. (2000). *Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Alves, J.W.S. (2017). *Cenários quantitativos de gases de efeito estufa e energia pela gestão de resíduos na Macrometrópole Paulista*. Ph.D. thesis.
- Bidone, F.A. (2001). Resíduos sólidos provenientes de coletas especiais: eliminação e valorização.
- Biogás, M.E. (2021). Grupo gerador a biogás ggb 200. URL <http://biogasmotores.com.br/produto/15-grupo-gerador-a-biogas-ggb-200>.
- Bove, R. and Lunghi, P. (2006). Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. *Energy conversion and management*, 47(11-12), 1391–1401.
- Brasil (2010). Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. institui a política nacional de resíduos sólidos; altera a lei nº 9605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.
- Brito, M. (2006). *Taxa de Emissão de Biogás e Parâmetros de Biodegradação de Resíduos Sólidos Urbanos no Aterro Metropolitano Centro. 2006. 185 f.* Ph.D. thesis, Dissertação (Mestrado profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais).
- Change, I.I.P.O.C. (1996). Guidelines for national greenhouse inventories. *Reference Manual*.
- Coelho, S.T., VELAZQUEZ, S.M.S.G., SILVA, O.C.d., et al. (2006). Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. *Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural*.
- Neto, M.R.B. (2012). *Geração de energia elétrica: fundamentos*. Saraiva Educação SA.
- Piñas, J.A.V., Venturini, O.J., Lora, E.E.S., Oliveira, M.A.d., and Roalcaba, O.D.C. (2016). Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no brasil: comparação dos modelos landgem (epa) e biogás (cetesb). *Revista Brasileira de Estudos de População*, 33, 175–188.
- PMFI (2012). *Plano Municipal de Saneamento Básico Municipal de Foz do Iguaçu*. Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu.
- Pullen, T. (2015). *Anaerobic Digestion-Making Biogas-Making Energy: The Earthscan Expert Guide*. Routledge.
- Rohstoffe, F.N. (2010). Guia prático do biogás: geração e utilização. *Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha*.
- Sbalqueiro, L.C. (2014). Estudo da viabilidade econômica do aproveitamento do biogás produzido no aterro sanitário de foz do iguaçu-pr como fonte de energia elétrica.
- Schmoeller, L. (2019). Análise de rendimento para grupos motogeradores movidos a biogás de fabricação nacional.
- Silva, A.K.M.d. and Mota, F.S.B. (2019). *Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos: Aproveitamento do Biogás*. Editora Appris.
- Turns, S.R. (2013). *Introdução à Combustão-: Conceitos e Aplicações*. AMGH Editora.
- Vieira, A.E. (2020). Geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos no aterro sanitário de foz do iguaçu.