



## **LandGEM model collection and use system for estimating the potential energy of biogas generated in landfills. Case study at the solid waste landfill of Manaus/Am**

**Rodrigo Pascarelli Rebouças Fernandes<sup>1</sup>, Melissa de Andrade Nogueira<sup>2</sup>, Italo Jorge Tavares Jimenez<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup> Centro Universitário do Norte – UNINORTE - *Laureate Universities*, Brasil, Rua Igarapé de Manaus, 211 – Centro, Manaus/AM

<sup>3</sup> Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (ITEGAM), Av. Joaquim Nabuco, 1950 – Centro, Manaus/AM .

Email: [pascarellirodrigo@gmail.com](mailto:pascarellirodrigo@gmail.com), [melissaanogueira@hotmail.com](mailto:melissaanogueira@hotmail.com), [italo.jimenez@itegam.org.br](mailto:italo.jimenez@itegam.org.br)

### **ABSTRACT**

**Received:** July 18<sup>th</sup>, 2018.

**Accepted:** August 08<sup>th</sup>, 2018.

**Published:** September 30<sup>th</sup>, 2018.

Copyright ©2016 by authors and Institute of Technology Galileo of Amazon (ITEGAM).

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International

License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



One of the main environmental problems of solid waste landfills is the gases emissions from the anaerobic decomposition of organic matter, the Biogas, which is a mixture of gases containing mainly methane and carbon dioxide, that causes the greenhouse effect. One of the ways of using biogas generated in landfills is the energy production, by converting it into some form of useful energy, such as electricity, steam, boiler fuel or fuel, or supplying gas pipelines with good gas. This work aims to study the biogas energy potential of the Urban Solid Waste Landfill of Manaus / AM. The urban solid waste landfill of Manaus / AM receives a daily average of 3 thousand tons of solid waste. Since 2008, the Manaus Landfill has a Biogas Plant, responsible for capturing and flaring the generated methane, and subsequent generation of carbon credits. The landfill presented theoretical biogas production in the range of 271 million m<sup>3</sup>/year in 2013, and a potential for electric power generation of approximately 13 MWh/day in 2013. After analysis, the generated biogas in the Manaus landfill presents a high possibility of use as fuel for generator sets, boilers and thermoelectric plants instead of natural gas.

**Keywords:** Urban solid waste, biogas, energy.

## **Sistema de coleta e utilização do modelo *LandGEM* para estimativa do potencial energético de biogás gerado em aterro. Estudo de caso no aterro de resíduos sólidos urbanos de Manaus/Am**

### **RESUMO**

Um dos problemas ambientais advindos do aterramento do lixo são as emissões de gases oriundos da decomposição anaeróbica da matéria orgânica, o Biogás, que é uma mistura de gases que contém principalmente metano e dióxido de carbono, que são causadores do efeito estufa. Uma das formas de aproveitamento do biogás gerado nos aterros sanitários é a geração de energia, o que consiste em convertê-lo em alguma forma de energia útil, como eletricidade, vapor, combustível para caldeiras ou fogões, combustível veicular, ou para abastecer gasodutos com gás de qualidade. Objetivo desse trabalho é estudar o potencial energético do biogás do Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos de Manaus/AM. O Aterro de resíduos sólidos urbanos de Manaus/AM recebe uma média diária de Três Mil toneladas de resíduos sólidos. Desde o ano de 2008 o Aterro de Manaus passa a contar com uma Usina de Biogás, responsável pela captação e queima em *flare* do metano gerado, e posterior geração de créditos de carbono. O aterro apresentou uma produção teórica de biogás na faixa de 271 milhões m<sup>3</sup>/ano em 2013, e um potencial de geração de energia elétrica de aproximadamente 13 MWh/dia em 2013. Após análise, o biogás gerado no aterro de Manaus apresenta elevada possibilidade de uso como combustível para grupo geradores, caldeiras e Termelétricas em substituição ao gás natural.

**Keywords:** Resíduos sólidos urbanos, biogás, energia.

## I INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o mundo vem tomando consciência de que estamos vivendo um momento de crise ambiental cada vez mais evidente, a água já não é mais vista como um recurso ilimitado, o sol além de fonte de luz se tornou uma fonte de energia potencial, o lixo não é mais algo sem nenhuma utilidade. Devido a isso se busca novas fontes de energia sustentável para substituir as fontes atuais.

O modelo de desenvolvimento atual, adotado pela grande maioria das nações, causam impactos ao meio ambiente que ultrapassam as suas fronteiras e alcançam uma escala global. O lançamento de dióxido de carbono na atmosfera, que tem como consequência o efeito estufa e o aquecimento terrestre, é um exemplo clássico de impacto que não repercute apenas no local onde ocorre, mas de maneira global [1]. A intensificação das atividades humanas nas últimas décadas gerou um acelerado aumento na produção de resíduos, tornando-se um grave problema para as administrações públicas.

O aumento desordenado da população e o crescimento sem planejamento de grandes núcleos urbanos dificultam as ações e o manejo dos resíduos, os quais, muitas vezes são depositados em locais não preparados para recebê-los, como lixões, e podem provocar graves problemas socioambientais [2]. Neste contexto, a disposição final do lixo urbano é um dos graves problemas ambientais enfrentados pelos grandes centros urbanos em todo o mundo e tende a agravar-se com o aumento do consumo de bens descartáveis, que passam cada vez mais a compor os grandes volumes de lixo gerados pela população [3].

Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil [4], o país produz 201.058 toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) por dia, dos quais 181.288 ton/dia são coletadas, e desse total coletado, a maior parte, 58%, tem como destinação final os Aterros Sanitários, 24,2% são destinados a Aterros Controlados, e 17,8% tem como destino final os Lixões.

Os lixões são vazadouros a céu aberto onde o lixo é lançado sobre o terreno, sem qualquer cuidado de, após o dia de trabalho cobri-lo com uma camada de terra. Já os aterros controlados são locais utilizados para despejo de lixo coletado, com o simples cuidado de, após a jornada de trabalho cobri-lo com uma camada de terra.

Já os Aterros Sanitários são uma das formas de disposição final de RSU mais econômica e segura do ponto de vista ambiental. Consiste na disposição dos resíduos no solo por meio do seu confinamento em camadas posteriormente cobertas com terra, atendendo às normas operacionais, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, e minimizando os impactos ambientais. Antes da deposição do lixo, é feita a impermeabilização do solo por meio de camadas de argila e uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) para evitar infiltração dos líquidos percolados (chorume) no solo. O lixo é depositado sobre o terreno e depois recoberto com camadas do solo do próprio local, isolando-o do meio ambiente. Formam-se então câmaras, nas quais é produzido o gás e liberado o chorume. O chorume é captado por meio de tubulações e escoado para tanques de tratamento, enquanto os gases produzidos são captados e podem ser queimados em flare ou ainda utilizados como fonte de energia. Seguindo normas técnicas brasileiras [5], o local da instalação do aterro deve ser cuidadosamente escolhido, abrangendo grandes dimensões e, devido a alguns inconvenientes como mau cheiro e tráfego de caminhões de lixo, deve estar localizado distante das concentrações urbanas, 500 m no mínimo, e também de cursos d'água, 200 m no mínimo.

Por outro lado, [6] considera que a necessidade de grandes áreas próximas aos centros urbanos, grandes quantidades de

material de cobertura e riscos de contaminação do solo, das águas e do ar, demonstram que os aterros devem ser muito bem controlados. Além disso, os aterros impossibilitam o reaproveitamento de materiais, o que evitaria a exploração de matéria-prima virgem na produção de novos bens de consumo, como também o total desperdício dos recursos energéticos contidos nos materiais dispostos nos aterros.

Um dos problemas ambientais advindos do aterramento do lixo são as emissões de gases oriundos da decomposição anaeróbica da matéria orgânica, o Biogás. O biogás é uma mistura de gases que contém principalmente metano e dióxido de carbono, que são causadores do efeito estufa.

A impermeabilização eficiente da base e da cobertura do aterro possibilita condições adequadas para a degradação da matéria orgânica, aumentando, consequentemente, a produção de biogás. Além disso, é uma maneira de minimizar contaminações tanto no solo como em lençóis freáticos [7].

Em função das ligações químicas entre os átomos de Hidrogênio e Carbono, o metano possui um elevado potencial energético (energia química) que quando reage com oxigênio, libera grande quantidade de calor (energia térmica) [8]. O Metano ( $\text{CH}_4$ ) leva menos tempo na atmosfera se comparado ao dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), porém o  $\text{CH}_4$  é mais eficiente para aprisionar radiação do que o  $\text{CO}_2$ , o potencial de aquecimento global do  $\text{CH}_4$  é 21 vezes maior do que o  $\text{CO}_2$  durante um período de 100 anos [9].

Tendo em vista o potencial impactante desses gases para o aquecimento do planeta, se fazem necessários projetos efetivos para minimizar as emissões provenientes de aterros de resíduos sólidos urbanos para a atmosfera.

Neste cenário, a ONU (Organização das Nações Unidas) teve a iniciativa de reunir os países para debater o tema, em dezembro de 1997, durante a COP 3, em Quioto Japão, chegaram ao chamado Protocolo de Quioto, no qual as nações industrializadas que aderiram à convenção se obrigaram a reduzir suas emissões de gases do efeito estufa que causam o aquecimento global. Entrou em vigor somente em fevereiro de 2005, após alcançar a ratificação do número mínimo de países desenvolvidos que correspondessem a 55% das emissões de gases do efeito estufa [10].

O Protocolo de Quioto cria o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que consiste em financiamento de projetos e programas por parte dos países desenvolvidos (Países do Anexo I), para controle de emissões de GEE em países em desenvolvimento (Países não- Anexo I), incentivando o comércio de emissões com a geração e comercialização de Reduções Certificadas de Emissões (RCEs), popularmente conhecidas como créditos de carbono, geradas a partir da redução de emissões desses projetos, os quais podem ser usados para compensar as metas dos países desenvolvidos.

Com o advento do Protocolo de Quioto e a criação do mercado de carbono regulado pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), configurou-se uma oportunidade real para a geração de recursos a partir do correto manejo dos sistemas de disposição de resíduos sólidos urbanos por meio do tratamento do biogás dos aterros sanitários, o que certamente é bastante positivo para o meio ambiente e para a qualidade de vida da população [11].

Os primeiros projetos de aproveitamento de biogás em aterros foram implantados ainda na década de 1970 nos Estados Unidos, como medidas de controle das emissões descontroladas de metano nesses locais e também como uma nova fonte de energia em meio às crises do petróleo daquela época. Posteriormente novos projetos surgiram em outros países, principalmente na Europa [7].

A captação do biogás em aterros sanitários é viável do ponto de vista econômico, energético e ambiental, trazendo redução de custos para a prefeitura local e um destino nobre para o lixo [12].

Uma das formas de aproveitamento do biogás gerado nos aterros sanitários é a geração de energia, o que consiste em convertê-lo em alguma forma de energia útil, como eletricidade, vapor, combustível para caldeiras ou fogões, combustível veicular, ou para abastecer gasodutos com gás de qualidade.

A recuperação do biogás para geração de energia oferece significativos benefícios econômicos, ambientais e energéticos. Os benefícios são aproveitados por muitos atores, incluindo o proprietário e/ou o operador do aterro sanitário, as empresas responsáveis pelo desenvolvimento de projetos e/ou vendedoras de equipamentos, os distribuidores e consumidores de energia, e as comunidades residentes nas proximidades dos aterros sanitários [13].

A previsão da produção de biogás é importante para um melhor gerenciamento e controle da queima do biogás de um aterro. Para isso existem várias metodologias que auxiliam na estimativa teórica da produção de biogás em aterros sanitários. O objetivo de um modelo é descrever, em termos simples, as alterações complexas verificadas durante a decomposição dos resíduos em um aterro [4].

O uso de modelos de previsão para a produção de biogás surge no início dos anos 80, apesar de que na época ainda não existia total compreensão das implicações da emissão de metano para a atmosfera. No entanto, houve um despertar para a possibilidade do aproveitamento energético do biogás como fonte de energia alternativa, em que os modelos usados ajudariam a estimar a quantidade produzida ao longo de um período de tempo. Com o passar dos anos, houve um aperfeiçoamento dos modelos de modo a obter resultados mais precisos, mesmo sabendo que cada país possui características próprias que vão influenciar a resposta de cada modelo. Cada modelo tem características próprias, que dificultam o seu uso de forma generalizada. Apesar de existirem vários modelos para estimar a produção e emissão de biogás, nenhum pode ser visto como o mais correto. Diferentes modelos podem obter diferentes resultados, mesmo que o input tenha sido o mesmo [14].

Para o cálculo do potencial de geração de biogás no aterro foi utilizada a metodologia da *United States Environmental Protection Agency*. [9], o modelo *LandGEM*.

O modelo *LandGEM* v3.02 é um modelo de primeira ordem que permite estimar a produção de biogás de um aterro, o valor aproximado de geração de metano, dióxido de carbono e compostos orgânicos voláteis não metânicos (COVNM), bem como a quantidade de outros poluentes gerados pelos RSU.

O modelo emprega uma função exponencial de decaimento de primeira ordem, baseada na idéia de que o montante de biogás gerado a partir dos resíduos sólidos alcança um pico após um determinado período de tempo para geração de metano. O período pressuposto pelo modelo é de um ano entre a destinação dos resíduos e a geração do biogás. O modelo também presume que, para cada unidade de resíduos, a geração de LFG (do inglês, *Landfill gas*) diminui exponencialmente (após o intervalo de um ano) à medida que a fração orgânica dos resíduos é consumida [4].

Para determinar o volume de metano que é gerado, o modelo utiliza a capacidade de geração de metano existente e a quantidade de resíduos que é depositada em aterro. Para tal, foram atribuídos valores regulamentares delineados pelo *Clean Air Act* (CAA) e valores baseados em vários relatórios de aterros da USEPA, para a taxa de geração de metano ( $k$ ) e para o potencial de geração de metano ( $L_0$ ). Nos *inputs* do modelo, é

considerado o total de resíduo que é depositado por ano. Desse modo, o modelo considera que a degradação do resíduo ao longo do tempo é constante e uniforme para todo o volume desse ano [14].

O Aterro de resíduos sólidos urbanos de Manaus/AM recebe uma média diária de três mil toneladas de resíduos sólidos, oriundos de coleta domiciliar, comércio e prédios públicos, varrição de logradouros, resíduos hospitalares e de poda de árvores, maior parte desse volume é resíduo orgânico, cerca de 35% do total.

Desde o ano de 2008 o Aterro de Manaus passa a contar com uma Usina de Biogás, responsável pela captação e queima em *flare* do metano gerado, e posterior geração de créditos de carbono. Assim como a operação do aterro acontece de domingo a domingo, 24 horas por dia, a queima dos gases do aterro não para, com uma vazão atual aproximada de 6.500 m<sup>3</sup>/h, já superou a vazão definida no projeto inicial de 5.000 m<sup>3</sup>/h, provando o potencial do aterro de Manaus para a produção de gás de aterro. Apesar do grande benefício ao meio ambiente, ao se evitar a emissão do metano à atmosfera, já é consenso entre os pesquisadores da área que só a queima do metano é um desperdício tendo em vista o potencial energético dos gases gerados a partir do lixo.

Atualmente a usina de Biogás do aterro de Manaus não conta com um sistema de aproveitamento energético do gás de aterro, porém uma implantação futura se mostra viável e deve ser estudada. Objetivo desse trabalho é estudar o potencial energético do biogás do Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos de Manaus/AM.

## II DESENVOLVIMENTO

A área de estudo desse trabalho se concentra no Aterro de resíduos sólidos urbanos de Manaus, localizado no Km 19 da Rodovia AM-010 que liga Manaus a Itacoatiara. Possui uma área plana de 395.000 m<sup>2</sup>, e segundo o Serviço Geológico do Brasil (CPRM), a área está inserida na Bacia do Igarapé Matrinxã, afluente do Igarapé Acará, o qual se junta com o Igarapé de Santa Etelvina para formar o Igarapé da Bolívia.

Os núcleos populacionais mais próximos do aterro são as comunidades Lagoa Azul, Ismael Aziz, São João e União da Vitória. Fora do raio de dois quilômetros estão as comunidades de Santa Tereza, Bom Jardim, Jardim Fortaleza, Novo Milênio, Ingá, Jardim Raquel e Chácara Castanheiras.

Atualmente é o único destino para o lixo gerado no município, recebendo cerca de 3.000 toneladas por dia, 90.000 toneladas por mês, oriundos de coleta domiciliar, comércio e prédios públicos, varrição de logradouros, resíduos hospitalares e de poda de árvores [15].

A coleta de dados se deu a partir de pesquisa documental e bibliográfica, baseadas em pesquisas em artigos técnicos, relatórios, dissertações de mestrado, teses de doutorado, juntamente com a literatura disponível, bem como a partir de observações e dados obtidos na área de estudo, o Aterro de Resíduos Sólidos de Manaus.

Para estimar a geração de biogás no aterro foi utilizado o modelo *LandGEM*. Este modelo parte do pressuposto que todos os resíduos que são depositados em aterro possuem a mesma capacidade de gerar biogás e que o seu potencial é constante, fazendo com que o seu uso seja relativamente simples na obtenção de resultados. Este modelo funciona em formato *EXCEL* e está disponível na página da internet da USEPA. Inicialmente para o funcionamento do modelo é inserir a data de início da deposição de resíduos e o ano de encerramento.

O modelo *LandGEM* pode ser descrito como:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) (e^{-kt_{ij}}) \quad (1)$$

Onde,  $Q_{CH_4}$  é a quantidade de metano gerado em determinado ano [ $m^3/ano$ ],  $i$  representa o incremento de um ano,  $n$  é a diferença entre o ano de cálculo e o ano de início de aceitação,  $j$  é um incremento de 0,1 anos,  $k$  é taxa de geração de metano [ $ano^{-1}$ ],  $M_i$  é massa depositada no ano  $i$ ,  $L_0$  representa a capacidade potencial de geração de metano [ $m^3/t$ ],  $t_{ij}$  é a idade da secção  $j$  do resíduo de massa  $M_i$  aceite no ano  $i$  [9].

Adicionalmente, existem dois parâmetros fundamentais para o funcionamento do modelo: a porcentagem de metano presente no biogás e a taxa de geração de metano ( $k$ ). Para a porcentagem de metano adotamos o valor de 50%, vale ressaltar que o projeto de tratamento de biogás do aterro de Manaus costuma trabalhar com concentração de metano acima disso, geralmente entre 52% a 56%, adotamos o valor de 50% para facilitar os cálculos. Para a taxa de geração de metano [16], o valor de  $k$  pode ser calculado através:

$$k = 3,2 \times 10^{-5} \times P_{ma} + 0,01 \quad (2)$$

onde,  $P_{ma}$  é a precipitação média anual [mm].

O valor da precipitação média anual foi obtido através da consulta ao website do Instituto Nacional de Meteorologia (IMET) [17]. Assim, encontrado o valor de  $k = 0,08$ .

A quantidade de resíduo é fornecida em Mg/ano, ou seja, toneladas por ano. De acordo com os dados obtidos, foi inserida a data de abertura e encerramento do aterro, que corresponde ao período de tempo desde o início da deposição, 1986, até o ano previsto para o seu encerramento, 2021.

Após todos os dados serem introduzidos, os resultados são imediatos, devido ao fato de funcionar através de uma folha de cálculo em que as expressões necessárias estão predefinidas. Os resultados surgem sob a forma de tabela, com valores ou gráficos, onde há a separação dos valores do biogás, metano e dióxido de carbono produzidos para cada ano de funcionamento do aterro, ao longo de um horizonte temporal de 140 anos.

Para determinar o potencial energético são utilizadas as seguintes equações (3) e (4) [18]:

$$P_x = \left( \frac{Q_x \times P_c}{31536000} \right) \times E_c \times \left( \frac{k}{1000} \right) \quad (3)$$

Onde:

$P_x$  = Potência disponível a cada ano (kW);

$Q_x$  = vazão de metano a cada ano ( $m^3CH_4/ano$ );

$P_c$  = poder calorífico de metano =  $35,53.10^6 J/m^3CH_4$ ;

$E_c$  = eficiência de coleta de gases (%) = 75% sugerido pela CETESB;

$K = 1000$  (adimensional).

$$E_{disp} = \frac{P_x}{365 \times 24} \quad (5)$$

Onde:

$E_{disp}$  = energia disponível (kW);

$P_x$  = potência disponível (kW); 365 = dias/ano

24 = h/dia

### III RESULTADOS

#### III.1 O PROJETO DE CAPTAÇÃO E QUEIMA DE GÁS DE ATERRO DE MANAUS/AM

Com a intenção de implantar um sistema de captação de gases no aterro de Manaus, a partir do ano de 2007 foi realizado um teste em célula piloto para analisar o potencial de geração de biogás no aterro de resíduos sólidos de Manaus.

A célula piloto apresentava dimensões de 420 m x 70 m x 5 m, com um volume de 147,00  $m^3$ . No ano de 2007, 114.660 toneladas de lixo foram depositadas nesta célula, sendo sua produção de gases monitorada durante os anos de 2008 e 2009 através de um sistema piloto de captação de biogás (Figura 1).



Figura 1: sistema piloto de captação de biogás. Fonte: Acervo do Aterro de Manaus. Fonte: Autores, (2018).

Esse estudo gerou resultados satisfatórios, com vazão de 800  $m^3$  de biogás, e concentração de metano a 57%. O que mostrou a viabilidade da implantação de um sistema de captação de biogás no aterro de Manaus para geração e comercialização das Reduções Certificadas de Emissões (RCEs), ou, créditos de carbono.

Em outubro de 2008 iniciou-se a construção da planta da usina de biogás, e a instalação foi comissionada em Julho de 2009 (Figura 2).



Figura 2: Planta de Captação e Queima de Biogás do Aterro de Manaus.

Fonte: Autores, (2018).

O sistema de captação e queima de LFG apresenta três componentes principais, a saber:

- Sistema de captação e coleta de LFG instalado dentro dos limites de resíduos que inclui a tubulação para transportar o

biogás do sistema para a instalação de queima de LFG.

- Sistema de gestão de condensado que remove o líquido condensado do sistema de coleta e direciona o condensado para o sistema de drenagem de lixiviados para a eliminação.
- Unidade / planta de LFG composta por equipamentos mecânicos e elétricos necessários para a extração e envio do LFG para eliminação por queima.

O sistema de captação e coleta de LFG segue uma tendência usada mundialmente nesse tipo de atividade, a captação com drenos verticais e ainda com drenos horizontais, trincheiras escavadas em meio ao lixo. Os drenos utilizados no sistema são feitos, normalmente, de cloreto de polivinila (PVC) ou de polietileno de alta densidade (PEAD), devido a características comuns a esses materiais de resistirem à corrosão e apresentarem boa flexibilidade. Estes são mostrados nas.

Os drenos verticais (Figura 3) e horizontais (Figura 4) são conectados a tubulação de coleta, as quais possuem diâmetros maiores, variando entre 160 mm, 315 mm e 400 mm, essas tubulações transportam o LFG para a estação de queima de gás.



Figura 3: Dreno vertical antes e após ser conectado ao sistema de coleta.  
Fonte: Autor, (2018).



Figura 4: Instalação de um Dreno horizontal.  
Fonte: Autor, (2018).

A tubulação de coleta pode ser conectada a todos os manifolds ou estação de queima de gás ao redor do aterro. Os manifolds foram projetados para regular a concentração do gás (metano, oxigênio, entre outros). O uso do PEAD para tubulação

de coleta é o mais indicado, pois este tem a vantagem de ser mais flexível e mais resistente à alta pressão em comparação com equipamentos de metal ou concreto, a desvantagem é o seu alto custo envolvido. A Figura 5 mostra parte da tubulação de coleta.



Figura 5: Tubulação de coleta em PEAD 315 mm.  
Fonte: Autor, (2018).

O LFG encontra-se normalmente saturado quando é extraído do aterro sanitário. Como o gás é retirado do sistema de coleta de LFG, forma-se condensado na tubulação. O sistema de remoção de condensado remove o líquido e partículas pesadas do biogás. A umidade é depositada nas paredes do cilindro, em seguida, o condensado percorre as paredes do separador e é drenado por gravidade através de um dreno de polietileno para a caixa de condensado (Figura 6).



Figura 6: Caixa de remoção de condensado.  
Fonte: Autor, (2018).

O condensado acumulado é drenado periodicamente por uma bomba, e direciona o condensado para o sistema de drenagem de lixiviados do aterro para a eliminação.

Esse sistema tem a finalidade de reduzir o desgaste dos componentes do sistema, principalmente dos sopradores, e assim evitar paradas do sistema para manutenção.

Existe também uma gestão desse condensado nas linhas de captação do LFG, a tubulação principal é nivelada para pontos baixos onde o condensado é coletado e drenado. Estes drenos de condensados são localizados e instalados nos pontos baixos da linha. Esse procedimento evita a formação de selos hidráulicos nas linhas, que impedem a passagem do LFG.

A estação de queima de LFG, conta com diversos

equipamentos responsáveis pela captação e a queima do LFG, monitoramento e registros dos dados do processo, estes são descritos a seguir.

Para controle e operação de todo o sistema de gestão de LFG, é utilizado um Controlador Lógico Programável (Programmable Logic Controller - PLC), o qual tem por objetivo facilitar a operação automatizada e acompanhamento dos elementos de comando (soprador, analisador de biogás, sistema de ignição do flare, etc.) e componentes associados ao sistema, e também um sistema da empresa Landtec, especializada no fornecimento de soluções tecnológicas para aterros sanitários, o FSU (Field Server Units), sistema de computador que monitora as operações de todo o sistema de gestão do LFG e de coleta e registro dos dados das operações, tais como a vazão, temperatura de queima, alarmes, etc.

O PLC do sistema LFG controla o funcionamento do flare, recebendo sinais de entrada através da lógica de controle programados no PLC do flare, e depois envia sinais de saída para os equipamentos (por exemplo, válvulas, etc.) para operar como necessário.

Já o FSU faz o registro de dados com informações da concentração de metano e de oxigênio no LFG; controle de temperatura do flare; os dados de todos os quatro termopares (TE 200, TE 202A, 202B TE e TE 202C), e a vazão de LFG.

Um componente importante do sistema é a Válvula de segurança de atuação pneumática, localizada imediatamente após o tanque de condensado, ela atua como uma válvula de emergência entre o sistema de coleta de LFG e o sistema de queima de LFG. A válvula de segurança é controlada por um atuador pneumático equipado com um mecanismo de retorno por mola, ela se abre para permitir o fluxo ao receber um sinal do PLC, para acender ou purgar o sistema, e se fecha quando recebe sinal do PLC para desligar, ou quando falta energia na unidade ou ainda quando acionada a parada de emergência.

Os sopradores (Figura 7) são responsáveis pelo fornecimento de pressão negativa para o aterro, soprando o gás para a tubulação. São dimensionados de acordo como uso final do gás (flare, caldeira, eletricidade, etc.).



Figura 7: Conjunto de Sopradores.  
Fonte: Autor, (2018).

A estação de LFG de Manaus conta com dois sopradores com rotação máxima dos seus motores de 3.600 rpm cada, e ainda mantém espaço para a instalação futura de mais um soprador. A velocidade dos sopradores pode ser controlada pelo Inversor de frequência ajustável (VFD). Cada soprador conta com o seu respectivo VFD, estes ficam localizados no interior da sala de controle.

O sistema conta também com um Analisador de Gás de

Aterro da Landtec (*Field Analytical Unit - FAU*), Figura 8, que tem o objetivo de monitorar as concentrações de metano e oxigênio para o sistema de diagnóstico e efeitos de desempenho. Além disso, a concentração de metano é analisada para monitorar a qualidade do gás coletado.



Figura 8: Analisador de Gases – FAU.  
Fonte: Autor, (2018).

A linha de amostragem de LFG está ligada ao fluxo de LFG entre o soprador e o flare. Um tubo de aço inoxidável transporta o gás para o analisador de LFG. (Esta linha de amostragem é automaticamente isolada por uma válvula solenoide, quando o analisador de metano é desligado ou colocado em modo de espera pelo PLC).

O gás é bombeado a uma vazão de aproximadamente 0,1 L/min para a unidade de análise de LFG. O gás é então analisado quanto a concentração volumétrica de metano e oxigênio. As porcentagens de metano e oxigênio do gás são exibidas no painel analisador LFG.

A vazão de biogás que é captada pelo sistema é monitorada continuamente através de um medidor térmico de fluxo. Este medidor de vazão (Figura 9) é composto por duas partes, uma haste metálica, onde está inserido um transdutor de fluxo, o qual é ligado à parte eletrônica do medidor, onde se dá o registro da vazão.



Figura 9: Medidor de Vazão de LFG.  
Fonte: Autor, (2018).

A destruição do teor de metano no LFG coletado é feita por um *flare* enclausurado, o que assegura uma destruição mais alta do metano, mínima de 98%.

O *flare* é composto por uma estrutura de aço que envolve uma câmara de combustão refratária, equipada com queimador de gás residual, ignição, e painel de controle, Figura 10.



Figura 10: *Flare* enclausurado.  
Fonte: Autor, (2018).

O flare utiliza um sistema de ignição automática movido a GLP. O diâmetro dos queimadores é de 200 mm com uma capacidade máxima de 6.500 m<sup>3</sup>/h de biogás, segundo o fabricante, entretanto em operação já chegou a suportar valores um pouco acima da sua capacidade máxima.

O *flare* é equipado com um soprador de purga, que opera antes da ignição para evacuar os gases remanescentes no flare.

GLP é usado durante a ignição para fornecer uma chama-piloto. No *flare*, a válvula solenoide da linha de alimentação de GLP liga e desliga o GLP. A chama piloto é confirmada por um scanner de chama ultravioleta.

Três termopares monitoram continuamente a temperatura da chama (TE 202A, 202B e 202C). Há duas janelas automáticas de controle de temperatura e duas janelas manuais, chamadas de “Dampers”. Os dampers automáticas são controladas por um controlador digital. O controlador lê a temperatura do termopar de controle (três superiores) e abre os dampers automáticos para esfriar a chama (adiciona ar) ou fecha automaticamente os dampers para aquecer (menos ar). O flare opera a uma temperatura mínima de combustão de 850 °C com tempo de residência do gás de pelo menos 0,75 segundos.

O monitoramento periódico e os ajustes no sistema de coleta de LFG são necessários para otimizar a eficácia do sistema de gestão de LFG. A válvula de controle em cada poço é ajustada para maximizar a coleta de LFG sem sobrecarregar as áreas do aterro que podem ser suscetível à entrada de ar.

A entrada de ar (que é composto de 21% de oxigênio) pode ter um impacto negativo sobre a decomposição dos resíduos. Bactérias, que facilitam o processo de decomposição metanogênica são anaeróbios, o que significa que sobrevivem e prosperam em um ambiente livre de oxigênio. A introdução de oxigênio no processo de decomposição metanogênica resultará na morte dos microrganismos anaeróbicos e resultará em um processo aeróbio. Isso pode resultar em uma redução da produção de metano, com um declínio associado ao potencial energético de recuperação. Além disso, a presença de oxigênio aumenta taxas

de recalque diferencial, aumento da temperatura no subsolo potencializando incêndios e o aumento dos problemas de odor. Como tal, é fundamental que a sucção de LFG no sistema de coleta não seja sobrecarregada, evitando assim a entrada de ar no maciço.

Uma série de equipamentos analíticos são necessários para efetuar o controle do sistema de coleta de LFG, os principais são:

- Manômetro digital;
- Medidor de gás;
- Medidor de fluxo de gás.

Pressão estática e diferencial podem ser medidas com um manômetro digital. A pressão estática do sistema é medida em relação à pressão atmosférica, ligando a linha de pressão positivo (+) do manômetro ao ponto de medição instalado no cabeçote do poço. A pressão da válvula só deverá ser lida quando a válvula de amostragem estiver aberta e o equilíbrio de pressão alcançado. Qualquer flutuação/pressões pulsantes também deve ser anotada. Qualquer líquido nos tubos de monitoramento fará com que a leitura seja errada.

Para realizar a medição de campo de gás (metano) utiliza-se um medidor de biogás da Landtec, o GEM 2000, ele permite as leituras de concentrações de biogás na faixa de 0 a 100% em volume de metano. Além disso, o analisador de gás deve permitir a medição das concentrações de dióxido de carbono na faixa de 0 a 50% em volume e concentração de oxigênio na faixa de 0 a 21% em volume.

O medidor de gás é operado através da conexão do medidor ao ponto de amostragem e monitoramento. Utiliza-se o método de amostragem contínua até que um volume suficiente de gás passe pelas linhas de amostragem assegurando que uma amostra representativa passe através do instrumento. Um conjunto completo de leituras pode ser tomado a partir do contador quando uma concentração estável é indicada no visor.

Deve-se tomar cuidado durante a obtenção de leituras de concentração de gás para garantir que as conexões estejam hermeticamente seladas.

O uso de um medidor digital de fluxo de gás portátil é capaz de relatar a velocidade do fluxo em metros por segundo (m/s), ou o fluxo em metros cúbicos por hora (m<sup>3</sup>/h), nos pontos de amostragem localizados ao longo do sistema de coleta de LFG.

Ajustes periódicos na posição das válvulas do cabeçote serão necessários para otimizar a eficácia do sistema de gestão de LFG. Ajustes no sistema de coleta de LFG deverão ser feitos com base em uma revisão do histórico do desempenho global da operação do sistema de coleta. Até mesmo mudanças relativamente pequenas para a sucção de um único poço influenciam na vazão e no vácuo de outros locais dentro do sistema de coleta de LFG.

Se forem encontradas concentrações de gás metano em um determinado poço, significativamente inferiores aos indicados no sistema de gestão de LFG, pode-se reduzir o vácuo deste poço. As válvulas de todos os poços devem ser deixadas pelo menos parcialmente abertas, a menos que as concentrações de oxigênio estejam abaixo dos 2% em volume.

Se a leitura da concentração de metano em um determinado poço está na faixa indicada no sistema de gestão de LFG, o vácuo neste poço pode ser aumentado. Um ciclo de monitoramento subsequente deve ser realizado para verificar se o poço não está sendo sobrecarregado. Os resultados de um monitoramento típico para um poço de bom desempenho devem ser:

- Vácuo: 0,5 a 10 polegadas de coluna d’água;

- Metano: 45-55 por cento em volume;
- Oxigênio: 0-2 por cento em volume.

O principal objetivo do ajuste do sistema de coleta de biogás é maximizar a quantidade de metano extraído de cada poço individual, minimizando a concentração de oxigênio no fluxo de LFG. Isto é conseguido através de um processo de ajustes na posição da válvula de cada poço, mudando o vácuo aplicado, e o fluxo associado em cada poço.

Note-se que um poço pode levar algum tempo para responder a um ajuste da válvula, variando de alguns minutos a vários dias. Ressalta-se que um ajuste em um poço afetará o restante dos poços no sistema de coleta de LFG. Como resultado, é recomendado que o ajuste de poços individuais sejam feitos em pequenos incrementos, com tempo bastante adequado, permitindo que todo o sistema de coleta de biogás retorne ao equilíbrio antes de fazer novos ajustes.

As mudanças sazonais também afetam o desempenho do sistema de gestão de LFG. Em particular, mudanças na permeabilidade do solo devido às variações na umidade do subsolo e da geada, podem ter efeitos dramáticos. Como resultado, um acompanhamento mais frequente e o ajuste devem ser realizados durante esses períodos sazonais.

### III.2 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E METANO

Para estimar precisou-se de informações sobre a quantidade de resíduos depositados no aterro ao longo do seu tempo de operação, desde o seu início em 1986 até o ano de 2013, e a estimativa futura até o ano de 2021, ano do seu encerramento (Tabela 1).

Tabela 1: Quantidade de Resíduos depositada no Aterro

| Ano  | Resíduos (Ton/ano) | Ano  | Resíduos (Ton/ano) |
|------|--------------------|------|--------------------|
| 1986 | 392.548            | 2000 | 902.933            |
| 1987 | 407.190            | 2001 | 932.930            |
| 1988 | 422.378            | 2002 | 1.159.188          |
| 1989 | 438.132            | 2003 | 1.142.709          |
| 1990 | 454.475            | 2004 | 1.458.013          |
| 1991 | 471.427            | 2005 | 792.149            |
| 1992 | 489.011            | 2006 | 821.518            |
| 1993 | 507.251            | 2007 | 884.510            |
| 1994 | 526.171            | 2008 | 1.051.116          |
| 1995 | 545.798            | 2009 | 1.027.769          |
| 1996 | 566.156            | 2010 | 1.051.231          |
| 1997 | 675.036            | 2011 | 1.122.337          |
| 1998 | 765.871            | 2012 | 954.832            |
| 1999 | 775.284            | 2013 | 946.224            |

Fonte: [15] (Adaptado).

A partir dos dados de deposição de resíduos pode-se calcular a produção do biogás e do metano no aterro a partir do modelo *Landgem*, esses resultados são observados na Tabela 2.

Tabela 2: Estimativa de produção de Biogás e Metano

| Ano  | Resíduos (Ton/ano) | Biogás (m³/ano) | Metano (m³/ano) |
|------|--------------------|-----------------|-----------------|
| 1986 | 392.548            | -               | -               |
| 1987 | 407.190            | 10.302.478,56   | 5.151.239,28    |
| 1988 | 422.378            | 20.197.146,31   | 10.098.573,16   |
| 1989 | 438.132            | 29.729.687,09   | 14.864.843,55   |
| 1990 | 454.475            | 38.942.797,30   | 19.471.398,65   |
| 1991 | 471.427            | 47.876.494,32   | 23.938.247,16   |
| 1992 | 489.011            | 56.568.243,74   | 28.284.121,87   |
| 1993 | 507.251            | 65.053.234,30   | 32.526.617,15   |
| 1994 | 526.171            | 73.364.579,21   | 36.682.289,61   |
| 1995 | 545.798            | 81.533.475,67   | 40.766.737,84   |
| 1996 | 566.156            | 89.589.430,96   | 44.794.715,48   |
| 1997 | 675.036            | 97.560.313,59   | 48.780.156,80   |
| 1998 | 765.871            | 107.775.944,19  | 53.887.972,09   |
| 1999 | 775.284            | 119.590.136,01  | 59.795.068,01   |
| 2000 | 902.933            | 130.743.061,08  | 65.371.530,54   |
| 2001 | 932.930            | 144.388.660,52  | 72.194.330,26   |
| 2002 | 1.159.188          | 157.772.409,94  | 78.886.204,97   |
| 2003 | 1.142.709          | 176.065.358,11  | 88.032.679,05   |
| 2004 | 1.458.013          | 192.519.368,74  | 96.259.684,37   |
| 2005 | 792.149            | 215.983.542,16  | 107.991.771,08  |
| 2006 | 821.518            | 220.167.996,13  | 110.083.998,06  |
| 2007 | 884.510            | 224.801.526,89  | 112.400.763,45  |
| 2008 | 1.051.116          | 230.732.054,87  | 115.366.027,43  |
| 2009 | 1.027.769          | 240.579.212,72  | 120.289.606,36  |
| 2010 | 1.051.231          | 249.056.557,56  | 124.528.278,78  |
| 2011 | 1.122.337          | 257.497.898,31  | 128.748.949,16  |
| 2012 | 954.832            | 267.156.421,15  | 133.578.210,58  |
| 2013 | 946.224            | 271.676.166,22  | 135.838.083,11  |
| 2014 | 946.224            | 275.622.494,26  | 137.811.247,13  |
| 2015 | 946.224            | 279.265.414,17  | 139.632.707,09  |
| 2016 | 946.224            | 282.628.253,10  | 141.314.126,55  |
| 2017 | 946.224            | 285.732.544,68  | 142.866.272,34  |
| 2018 | 946.224            | 288.598.166,98  | 144.299.083,49  |
| 2019 | 946.224            | 291.243.469,77  | 145.621.734,88  |
| 2020 | 946.224            | 293.685.392,01  | 146.842.696,01  |

Fonte: Autor, (2018).

Pode-se visualizar o comportamento da vazão do biogás e do metano gerados no aterro, onde a curva tem um comportamento crescente durante a o período em que o aterro recebe lixo, pois a cada nova tonelada de lixo depositada, soma-se um novo potencial de geração de biogás (Figura 11).

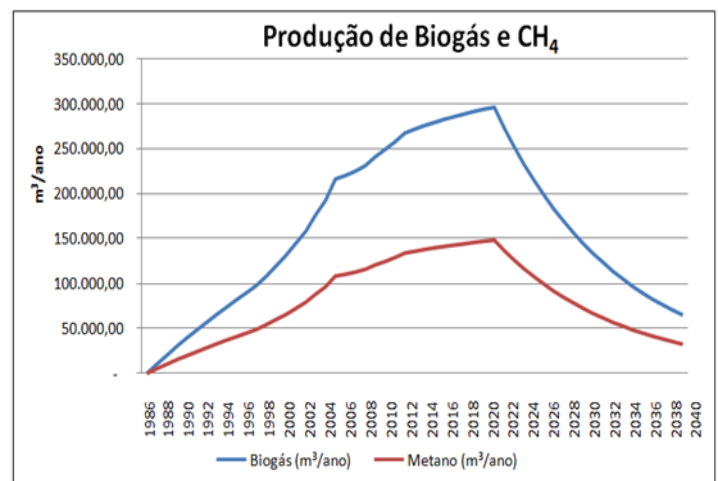


Figura 11: Produção de Biogás e Metano no Aterro.

Fonte: Autor, (2018).



A curva tem um comportamento crescente durante a o período em que o aterro recebe lixo, pois a cada nova tonelada de lixo depositada, soma-se um novo potencial de geração de biogás. O ponto máximo da Figura 11 mostra o último ano de deposição de resíduos no aterro (2021) e a partir daí a curva é regida pela constante de decaimento “k”, referente à degradação da matéria orgânica no tempo.

A produção de Biogás estimada até o ano de encerramento do aterro é de 293.685.392,01 m<sup>3</sup>/ano, e a vazão de metano de 146.842.696,01 m<sup>3</sup>/ano.

### III.3 POTENCIAL DE GERAÇÃO ENERGÉTICA

A partir dos dados obtidos pela estimativa de produção de metano foi possível calcular a potência (MW) e energia (MWh/dia) disponíveis (Tabela 3).

Tabela 3: Potência e energia Disponíveis.

| Ano  | Resíduos (Ton/ano) | Biogás (m <sup>3</sup> /ano) | Metano (m <sup>3</sup> /ano) | Potência Disponível (MW) | Energia Disponível (MWh/dia) |
|------|--------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| 1986 | 392.548            | -                            | -                            | -                        | -                            |
| 1987 | 407.190            | 10.302.478,56                | 5.151.239,28                 | 4.352,73                 | 0,497                        |
| 1988 | 422.378            | 20.197.146,31                | 10.098.573,16                | 8.533,16                 | 0,974                        |
| 1989 | 438.132            | 29.729.687,09                | 14.864.843,55                | 12.560,59                | 1,434                        |
| 1990 | 454.475            | 38.942.797,30                | 19.471.398,65                | 16.453,07                | 1,878                        |
| 1991 | 471.427            | 47.876.494,32                | 23.938.247,16                | 20.227,50                | 2,309                        |
| 1992 | 489.011            | 56.568.243,74                | 28.284.121,87                | 23.899,71                | 2,728                        |
| 1993 | 507.251            | 65.053.234,30                | 32.526.617,15                | 27.484,56                | 3,138                        |
| 1994 | 526.171            | 73.364.579,21                | 36.682.289,61                | 30.996,05                | 3,538                        |
| 1995 | 545.798            | 81.533.475,67                | 40.766.737,84                | 34.447,35                | 3,932                        |
| 1996 | 566.156            | 89.589.430,96                | 44.794.715,48                | 37.850,94                | 4,321                        |
| 1997 | 675.036            | 97.560.313,59                | 48.780.156,80                | 41.218,58                | 4,705                        |
| 1998 | 765.871            | 107.775.944,19               | 53.887.972,09                | 45.534,62                | 5,198                        |
| 1999 | 775.284            | 119.590.136,01               | 59.795.068,01                | 50.526,04                | 5,768                        |
| 2000 | 902.933            | 130.743.061,08               | 65.371.530,54                | 55.238,07                | 6,306                        |
| 2001 | 932.930            | 144.388.660,52               | 72.194.330,26                | 61.003,25                | 6,964                        |
| 2002 | 1.159.188          | 157.772.409,94               | 78.886.204,97                | 66.657,79                | 7,609                        |
| 2003 | 1.142.709          | 176.065.358,11               | 88.032.679,05                | 74.386,44                | 8,492                        |
| 2004 | 1.458.013          | 192.519.368,74               | 96.259.684,37                | 81.338,15                | 9,285                        |
| 2005 | 792.149            | 215.983.542,16               | 107.991.771,08               | 91.251,61                | 10,417                       |
| 2006 | 821.518            | 220.167.996,13               | 110.083.998,06               | 93.019,51                | 10,619                       |
| 2007 | 884.510            | 224.801.526,89               | 112.400.763,45               | 94.977,15                | 10,842                       |
| 2008 | 1.051.116          | 230.732.054,87               | 115.366.027,43               | 97.482,76                | 11,128                       |
| 2009 | 1.027.769          | 240.579.212,72               | 120.289.606,36               | 101.643,12               | 11,603                       |
| 2010 | 1.051.231          | 249.056.557,56               | 124.528.278,78               | 105.224,74               | 12,012                       |
| 2011 | 1.122.337          | 257.497.898,31               | 128.748.949,16               | 108.791,15               | 12,419                       |
| 2012 | 954.832            | 267.156.421,15               | 133.578.210,58               | 112.871,81               | 12,885                       |
| 2013 | 946.224            | 271.676.166,22               | 135.838.083,11               | 114.781,37               | 13,103                       |
| 2014 | 946.224            | 275.622.494,26               | 137.811.247,13               | 116.448,67               | 13,293                       |
| 2015 | 946.224            | 279.265.414,17               | 139.632.707,09               | 117.987,78               | 13,469                       |
| 2016 | 946.224            | 282.628.253,10               | 141.314.126,55               | 119.408,55               | 13,631                       |
| 2017 | 946.224            | 285.732.544,68               | 142.866.272,34               | 120.720,10               | 13,781                       |
| 2018 | 946.224            | 288.598.166,98               | 144.299.083,49               | 121.930,80               | 13,919                       |
| 2019 | 946.224            | 291.243.469,77               | 145.621.734,88               | 123.048,43               | 14,047                       |
| 2020 | 946.224            | 293.685.392,01               | 146.842.696,01               | 124.080,12               | 14,164                       |

Fonte: Autor, (2018).

Já o comportamento da curva de disponibilidade de potência e energia pode ser observado nas Figuras 12 e 13.

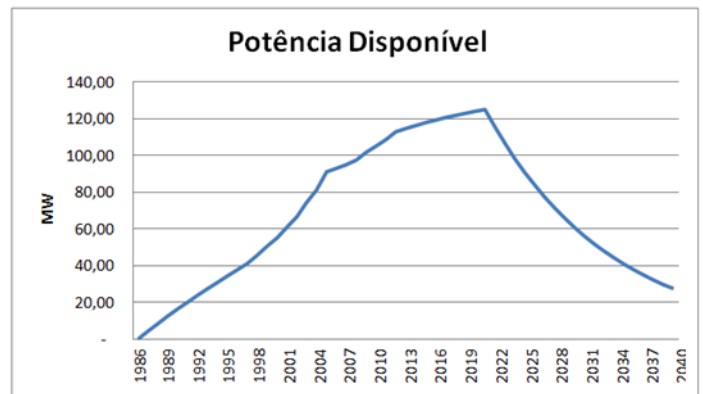


Figura 12: Potência Disponível estimada até o ano de encerramento.

Fonte: Autor, (2018).

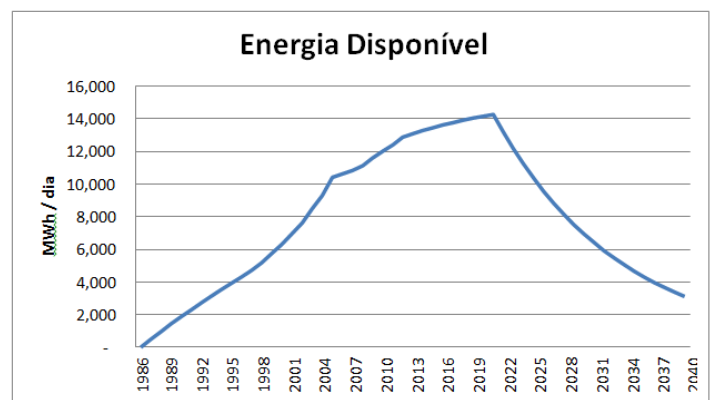


Figura 13: Energia Disponível estimada até o ano de encerramento.

Fonte: Autor, (2018).

Como potência e energia disponíveis são calculadas em função da vazão de metano, a curva destas também alcançam o pico máximo no ano de encerramento da deposição dos resíduos no aterro. Assim para o ano de encerramento, 2021, a potência e energia previstas são de 125.032,50 MW e 14,273 MWh/dia, respectivamente.

### III.4 POSSIBILIDADES DE USO DO BIOGÁS GERADO NO ATERRO DE MANAUS

O aproveitamento da energia contida no biogás pode ser feito de modo a atender diversas necessidades energéticas, tais como a geração de eletricidade, a geração de vapor, de calor, trabalho mecânico ou mesmo o uso direto como combustível automotivo. Os diversos aproveitamentos do biogás podem ser realizados utilizando-se caldeiras, motores de combustão interna, turbinas a gás, células combustíveis e outros conversores de energia [19].

Algumas dessas possibilidades podem ser aplicadas para uso com o biogás produzido no Aterro de Manaus como forma de se aproveitar o potencial energético desse gás, uma vez que todo o gás captado atualmente é destinado para queima em *flare* (Figura 14).

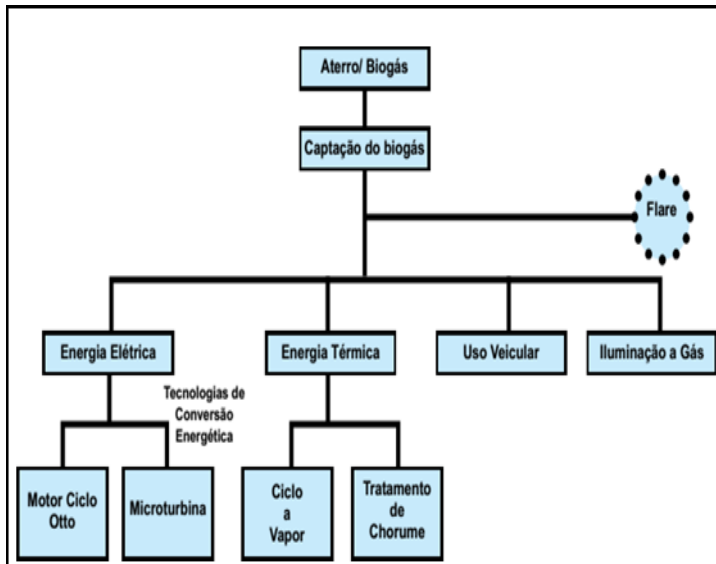


Figura 14: Diagrama dos usos mais comuns do Biogás gerados em aterros.

Fonte: [20]

Dentre os possíveis usos podemos citar a geração de energia através de grupo geradores movidos a biogás, uso para tratamento de chorume do aterro, uso do biogás como combustível para a Termelétrica Manaura em substituição ao gás natural utilizado na mesma.

### III.5 AUTOSUFICIÊNCIA DE ENERGIA ELÉTRICA DO ATERRO

O uso do biogás produzido no Aterro de Manaus como fonte de energia é um incremento na produção energética da região, principalmente para as imediações do Aterro.

O projeto de implantação inicial da usina de biogás no Aterro de Manaus contempla a construção de uma central elétrica alimentada com biogás, com aproximadamente 19,2 MW de capacidade instalada quando estivesse completa, composta por 12 grupos geradores com 1,6 MW cada (Figura 15).



Figura 15: Modelo de um grupo gerador movido a Biogás.

Fonte: [21].

Tal projeto, sendo proposto, teria capacidade de geração de energia elétrica superior a 80.000 MW/h por ano, o que é

suficiente para atender uma cidade com cerca de 150 mil habitantes.

O projeto tem dificuldades, pois o custo é alto e a falta de investidores é um entrave. A eletricidade gerada poderia atender a demanda total do Aterro, e o excedente seria comercializado com a concessionária de energia elétrica do município

### III.6 TRATAMENTO DE CHORUME DO ATERRO

Um dos maiores desafios para as empresas que operam aterros sanitários está em fazer com que os produtos da decomposição dos resíduos, o chorume e o biogás, tenham tratamento e destinação adequados, sem a criação de riscos e passivos ambientais [22].

O chorume, gerado a partir da decomposição anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos, contém alta carga poluidora e sua composição apresenta grande quantidade de amônia, cloretos, substâncias recalcitrantes, compostos orgânicos e inorgânicos [20].

Uma das possibilidades de aplicação para o biogás produzido no Aterro de Manaus é o uso deste no tratamento do chorume. Um dos sistemas utilizados para tratar o chorume é o processo de evaporação, o qual utiliza como combustível o biogás.

Segundo os autores [20], este processo permite uma redução de até 70% do volume de lixiviado. O tratamento é realizado em equipamento denominado Evaporador, onde o chorume é aquecido a altas temperaturas (Figura 16).

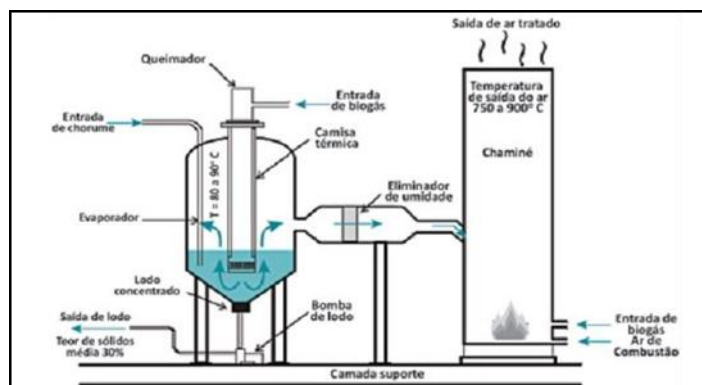


Figura 16: Modelo esquemático de um Evaporador de chorume.

Fonte: [20] (Adaptado).

O processo de aquecimento é realizado a partir da utilização do biogás como combustível. A fração líquida é evaporada, concentrando o teor de sólidos do chorume. O vapor quente passa por sistema de purificação para que possa ser lançado à atmosfera ou, então, para ser utilizado na geração de energia térmica de outros processos, como aquecimento ou refrigeração. O lodo adensado pode retornar para o aterro.

Este tipo de processo pode ser implementado em qualquer aterro sanitário, independente do porte do aterro e da quantidade de chorume produzido. O sistema de evaporação de chorume funciona por módulos. Cada módulo tem a capacidade de eliminação de 0,50 m<sup>3</sup>/h ou 12,5 m<sup>3</sup>/dia de chorume. A ordem de grandeza de investimento para cada módulo é de R\$ 70.000,00. O consumo de biogás é da ordem de 100 m<sup>3</sup>/h para cada módulo. Portanto, dependendo da quantidade de biogás produzido no aterro sanitário e quantidade de chorume a ser tratado, este sistema pode ou não ser viável [23].

Esta tecnologia já é empregada nos Estados Unidos e Europa, e no Brasil foi implementada com sucesso no Aterro de São Leopoldo – RS (Figura 17).



Figura 17: Evaporador de chorume em operação no Aterro de São Leopoldo-RS. Fonte: [22].

A implantação desse tipo de tratamento no Aterro de Manaus necessitaria de algumas modificações para atender as especificidades da região como temperatura e umidade altas. Dentre as vantagens para a implantação está o fato do aterro já contar com uma rede de captação de gases instalada atualmente.

### III.7 BIOGÁS DE ATERRO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A UTE Manauara, localizada no km 20 da rodovia estadual AM-10, em Manaus, entrou em operação comercial com óleo combustível em setembro de 2006, iniciou operação com gás natural em dezembro de 2010 (Figura18). Para gerar energia elétrica em sua capacidade máxima, essa UTE demanda 390 mil m<sup>3</sup>/dia de gás natural, e sua capacidade de geração de energia elétrica é de 85 MW, gerando integralmente a partir do gás natural [24].

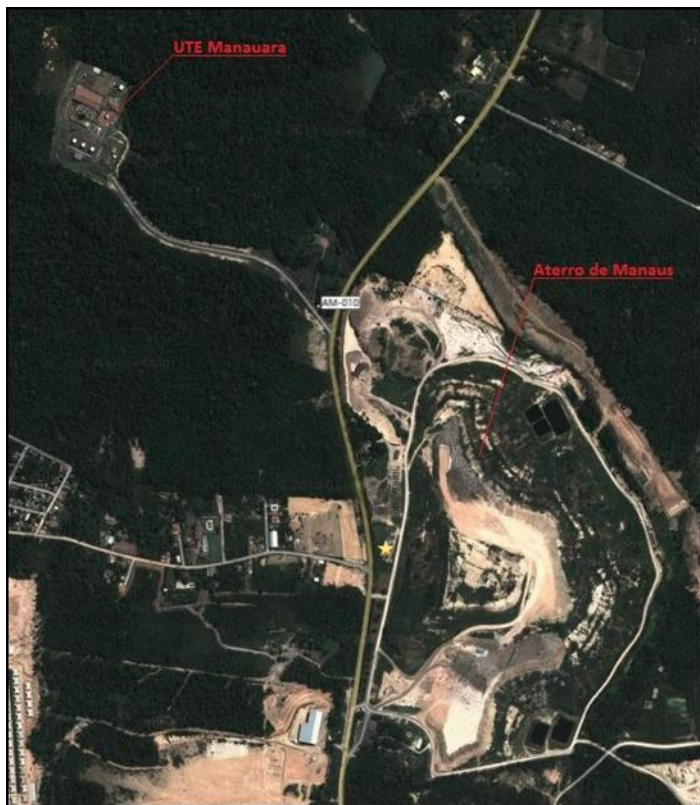


Figura 18: Distância entre Aterro e UTE Manauara. Fonte: Google Maps

O biogás gerado nos aterros pode ser usado em substituição ao gás natural de várias formas, necessitando para isso tratamentos específicos para cada tipo de utilização.

Essa proposta de uso do biogás surge a partir de dois fatos observados: A proximidade entre a UTE Manauara e o Aterro de Manaus, localizados praticamente um em frente ao outro (Figura XX); E a quantidade de biogás produzido no aterro calculada ser superior a demanda de gás natural para o funcionamento da UTE Manauara.

Apesar de apresentar boa oferta em quantidade de biogás, existe uma diferença entre o poder calorífico do biogás e do gás natural. O poder calorífico do biogás é inferior, em torno de 5.600 Kcal/m<sup>3</sup>, já o gás natural apresenta um poder calorífico de 9.300 Kcal/m<sup>3</sup> [25]. Assim se faz necessário o processamento desse gás para aumentar seu conteúdo energético e atender às severas normas relativas a sulfeto de hidrogênio, umidade, dióxido de carbono e NMOCs (Compostos orgânicos não metânicos).

Fases de remoção da umidade; remoção do enxofre; remoção de NMOCs, remoção de dióxido de carbono, dentre outros devem ser admitidas nesse processamento para atender as exigências para uso do biogás em substituição do gás natural.

A remoção do dióxido de carbono é o principal passo a ser dado para aumentar o conteúdo energético. A prevenção da infiltração de ar no campo de poços também é uma etapa crítica, não apenas porque a infiltração de ar reduz o conteúdo energético, mas também porque é uma etapa necessária para atender limitações estritas de nitrogênio e oxigênio do gás resultante [4].

A adição dos estágios de processamento para remover o nitrogênio e o oxigênio do biogás é amplamente considerada uma etapa caríssima e proibitiva [4, 9], porém isso dependerá do conteúdo energético requerido para o funcionamento dos motores da UTE. A proximidade do Aterro reduzirá custos logísticos do gás até a UTE, com a possibilidade de um gasoduto dedicado.

## IV CONCLUSÃO

Por meio de uma gestão eficiente dos resíduos sólidos urbanos é possível aproveitar o potencial energético do biogás e diminuir o consumo de combustíveis fósseis, consequentemente, reduzindo o impacto ambiental e contribuindo para melhoria social e econômica.

Os aterros sanitários representam uma das alternativas mais interessantes para a disposição final do lixo, considerando, posteriormente, a geração de biogás, pois dispõem de técnicas de captação dos gases liberados através de dutos e queima em *flares*, onde o metano, principal constituinte do biogás, é transformado em gás carbônico, com potencial de aquecimento global cerca de 20 vezes menor.

O Aterro de Manaus apresenta um grande potencial em relação a produção de biogás, principalmente por dois fatores característicos do clima da região em que se encontra, altas temperaturas e umidade elevada, condições essas que aceleram as reações metanogênicas.

O aterro apresentou uma produção teórica de biogás na faixa de 271 milhões m<sup>3</sup>/ano em 2013 e com previsão de chegar a 296 milhões m<sup>3</sup>/ano em 2021. Apresentou também um potencial de geração de energia elétrica de aproximadamente 13 MWh/dia em 2013, podendo chegar a 14,5 MWh/dia no ano de seu encerramento, 2021.

As possíveis aplicações energéticas do biogás apresentadas neste trabalho são algumas das muitas já existentes e aplicadas pelo mundo com sucesso, contribuindo para a diversificação das fontes de energias renováveis.

Ao analisar o potencial dos aterros de resíduos sólidos na

tentativa de implantar sistemas que permitam o aproveitamento do biogás, pode-se transformar um passivo ambiental em recursos financeiros tanto pela geração de energia como pela venda dos créditos de carbono.

## V REFERÊNCIAS

- [1] M. d. C. O. Pavan and V. Parente, "**Projetos de MDL em aterros sanitários do Brasil**: análise política, socioeconômica e ambiental," in *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 30, 2006, pp. 1-7.
- [2] A. P. Gomes, "**Diagnóstico e proposições para a gestão participativa e integrada dos resíduos sólidos urbanos no município de Passo Fundo, RS**," 2011.
- [3] V. PECORA, N. FIGUEIREDO, S. T. COELHO, and S. VELÁZQUEZ, "**Biogás e o mercado de créditos de carbono**," *Rio de Janeiro*, 2008.
- [4] A. B. D. E. DE LIMPEZA, "**PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS**," *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil*, 2012.
- [5] A.-A. B. D. N. TÉCNICAS, "**NBR 13.896**: aterros de resíduos não perigosos-critérios para projeto, implantação e operação," ed: ABNT Rio de Janeiro, 1997.
- [6] V. P. Garcilasso, S. VELÁZQUEZ, and S. T. Coelho, "**Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás Proveniente de Aterro Sanitário—Estudo de Caso**," in *XIII CBE-Congresso Brasileiro de Energia*, Rio de Janeiro, 2010.
- [7] A. V. Ensinas, "**Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas-SP**," 2003.
- [8] G. C. d. Santos, "**Política nacional de saneamento básico e mercado de carbono**: perspectivas no escopo de esgotamento sanitário," 2013.
- [9] A. Alexander, C. Burklin, and A. Singleton, *Landfill gas emissions model (LandGEM) version 3.02 user's guide*: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2005.
- [10] R. A. Gomes and K. T. L. OLIVEIRA, "**Contribuições da recuperação do biogás de aterro sanitário**: uma análise para Goiânia," ed, 2011.
- [11] J. M. d. Mesquita Júnior, "**Gestão integrada de resíduos sólidos**," *Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos*., 2007.
- [12] H. A. Soares, "**Captar biogás (ch4) dos aterros de resíduos e transformar em energia elétrica**," 2014.
- [13] P. R. Jacobi and G. R. Besen, "**Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade**," *Estudos avançados*, vol. 25, pp. 135-158, 2011.
- [14] J. M. d. C. Braga, "**Previsão da Produção de Biogás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos**," 2012.
- [15] SEMULSP, "**SECRETARIA MUNICIPAL DE LIMPEZA PÚBLICA - Aterro Sanitário**," 2013.
- [16] S. M. Miller, S. C. Wofsy, A. M. Michalak, E. A. Kort, A. E. Andrews, S. C. Biraud, *et al.*, "**Anthropogenic emissions of methane in the United States**," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 110, pp. 20018-20022, 2013.
- [17] INMET, "**Estação meteorológica de observação de superfície automática**," ed: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) Brasília-DF, Brasil, 2015.
- [18] F. C. de Abreu, V. Pecora, S. Velázquez, and S. Teixeira, "**Biogás de aterro para geração de eletricidade e iluminação**," 2008.
- [19] C. Hasan, "**Análise da sinergia de resíduos agroindustriais submetidos à biodigestão anaeróbia visando geração de biogás para aproveitamento energético**," 2017.
- [20] J. S. Peres, R. Z. Brumatti, and M. C. L. Couto, "**Aproveitamento de gás de efeito estufa (GEE) gerados de resíduos sólidos urbanos visando à sustentabilidade da matriz energética do Espírito Santo**," *REVISTA CIENTÍFICA FAESA*, p. 13.
- [21] H. H. Suining, "**Electrical Harness Life Improvement for Medium Wheel Loader Steel Mill Arrangements**," Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [22] F. G. Pileggi, "Inovação tecnológica no setor de aterros sanitários: o caso do evaporador de percolado (chorume) com a queima de biogás," *Sustentabilidade e Tecnologias de Baixo Carbono no Brasil*, p. 80, 2011.
- [23] G. A. Pereira, "**Análise técnica de um sistema de geração de energia usando biogás de aterro sanitário e máquinas térmicas**," 2017.
- [24] F. P. da Silva and A. M. M. de Lima, "**Avaliação da qualidade do ar pela mudança da matriz energética em usina termoeletrica: óleo para mistura óleo-gás natural**," *Revista Geografica Academica*, vol. 10, pp. 69-81, 2016.
- [25] N. J. V. FIGUEIREDO, "**Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás—estudo de caso**," *São Paulo*, vol. 89, 2007.