

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**  
**NARA APARECIDA FERREIRA**

**ANÁLISE DE PROCESSOS DE CAPTAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO**  
**SANITÁRIO: Digestão Anaeróbia e Incineração**

**Varginha**  
**2019**

**NARA APARECIDA FERREIRA**

**ANÁLISE DE PROCESSOS DE CAPTAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO  
SANITÁRIO: Digestão Anaeróbia e Incineração**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel.

**Varginha  
2019**

**NARA APARECIDA FERREIRA**

**ANÁLISE DE PROCESSOS DE CAPTAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO  
SANITÁRIO: Digestão Anaeróbia e Incineração**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em: / /

---

Prof.

---

Prof.

---

Prof.

OBS.:

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos professores do Centro  
Universitário do Sul de Minas, em especial a  
Prof. Luciene de Oliveira Prósperi.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.” José de Alencar

## RESUMO

O grande acúmulo de resíduos sólidos nos aterros sanitários dos centros urbanos, tem causado grande poluição nos solos. A camada de ozônio também tem sido agredida devido a um subproduto criado a partir desse acúmulo de resíduos, conhecido como metano. Reduzir o impacto ambiental nos centros urbanos tem sido desafio de grande parte do país, projetos como coletas seletivas tem sido implantado para amenizar o acúmulo de materiais descartados, porém, todavia não é o suficiente. Garantir uma fonte de energia renovável, independente de condições como ventos e altas temperaturas, e utilizar como principal combustível algo que seria descartado de maneira a causar dano ao ambiente seria utopia? A análise dos processos de captação de biogás estudados, tem como intuito recolher a maior porcentagem possível do gás encontrado na matéria orgânica descartada no aterro, e direcioná-lo com as menores perdas possíveis até a fonte geratriz de energia. Melhorias nas condições de trabalho/vivência dos colaboradores da coleta, seria uma das vantagens com a implantação dos sistemas, pois o mau odor causado pelo acúmulo a céu aberto da matéria orgânica, diminuiria consideravelmente já que a mesma será armazenada em regime de confinamento.

**Palavras – chave:** Resíduos sólidos. Biogás. Energia renovável.

## **ABSTRACT**

*The large accumulation of solid waste in urban landfills has caused great pollution in soils. The ozone layer has also been attacked due to a byproduct created from this accumulation of waste, known as methane. Reducing the environmental impact in urban centers has been a challenge in much of the country, projects such as selective collection have been implemented to soften the accumulation of discarded materials, but it is not enough. To guarantee a renewable energy source, regardless of conditions such as winds and high temperatures, and to use as main fuel something that would be discarded in a way that would cause damage to the environment would be utopia? The analysis of the biogas uptake processes studied aims to collect the largest possible percentage of the gas found in the organic matter disposed of in the landfill, and direct it with the lowest possible losses to the energy source. Improvements in the working conditions/experience of the collaborators of the collection would be one of the advantages with the implantation of the systems, because the bad odor caused by the open air accumulation of the organic matter, would diminish considerably since it will be stored under confinement regime.*

**Keywords:** *Solid waste. Biogas Renewable energy.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Relação entre poder calorífico do biogás e porcentagem de volume em metano.....	13
Figura 02 – Equivalência energética de 1 Nm <sup>3</sup> de biogás.....	14
Figura 03 – Esquema de funcionamento de um aterro.....	15
Figura 04 – Fases da digestão anaeróbia.....	17
Figura 05 – Resumo dos métodos cinéticoanaeróbicos.....	19
Figura 06 – Esquema do processo dranco.....	20
Figura07 – Processo de incineração.....	22

## LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Comparação entre os custos de investimento e operacionais.....	24
Quadro 02 – Análise de atendimento à PNRS.....	25
Quadro 03 – Emissões evitadas pelas alternativas.....	26
Quadro 04 – Balanço energético das alternativas.....	26

## LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÔNIMOS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AI – Alcalinidade intermediária

AME – Atividade metanogênica específica

AP – Alcalinidade parcial

ASTM – American Society for Testing and Materials

CH<sub>4</sub> – Metano

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

COV – Carga orgânica volumétrica

DIN – Deutsches Institut für Normung

EMAE – Empresa Metropolitana de Águas e Energia

H<sub>2</sub>O – Água

H<sub>2</sub>S – Gás Sulfídrico

ISO – Organização Internacional de Normalização

kWh/m<sup>3</sup> – Kilowatt hora por metro cúbico

MNCR – O Movimento Nacional de Catadores de Materiais Recicláveis

NBR – Norma Técnica

pH – Potencial hidrogeniônico de uma solução

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

VDI – Verein Detscher Ingenieure

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>BIOGÁS .....</b>	<b>13</b>
	<b>2.1 Poder calorífico do biogás .....</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>ATERRO SANITÁRIO .....</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS .....</b>	<b>17</b>
	<b>4.1 Digestão anaeróbia .....</b>	<b>17</b>
	<b>4.2 Incineração .....</b>	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>23</b>
	<b>5.1 Análise quanto ao valor de investimento .....</b>	<b>23</b>
	<b>5.2 Atendimento as normas PNRS .....</b>	<b>24</b>
	<b>5.3 Emissões de gases de efeito estufa .....</b>	<b>26</b>
	<b>5.4 Efeitos sociais .....</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>28</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>30</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Terra não oferece uma infindável quantia de energia, isso gera um grave problema ao setor de produção mundial, que a tempos vem usufruindo das fontes não renováveis oferecidas pela natureza pregando um progresso ilimitado. Se torna necessário então criar meios energéticos renováveis que viabilizem a ideia de progresso limpo, de maneira consciente preservando o amanhã.

Uma fonte de energia considerada limpa é aquela que se regenera, sendo assim inesgotável; não causando impactos ambientais. “A energia renovável é derivada de uma fonte que é reabastecida continuamente, como o sol, o rio, o vento ou a energia térmica dos oceanos do mundo” (MANYIKA et al., 2013, p. 138).

Apesar de não partir de uma fonte convencional como sol, vento, rio, etc... o biogás também é conhecido como fonte de energia renovável. Resultado da degradação de microrganismos sobre a biomassa de resíduos orgânicos, segundo Bley JR. (2015), o biogás faz parte do metabolismo natural do planeta, já que é um componente do ciclo biogeoquímico do carbono, o maior e mais abrangente entre os ciclos da Terra.

O presente estudo abordará uma análise de processos de captação de biogás em aterros sanitários, cujo objetivos são evitar a contaminação do ambiente, proporcionar melhores condições de trabalho nesses locais e contribuindo para um progresso sustentável.

Instalado um sistema cuja função seja redirecionar essa mistura de resíduos, posto assim seu subproduto como combustível para alimentar uma caldeira por exemplo, será possível gerar uma quantidade de energia. Trabalhando assim, o problema de poluição do solo é minimizado, e a degradação da camada de ozônio diminui consideravelmente já que durante o processo de queima do Biogás o  $\text{CH}_4$  nele encontrado é todo transformado em  $\text{CO}_2$ . E resultante da instalação dos sistemas, a energia gerada pode ser utilizada para fins lucrativos e/ou benéficas.

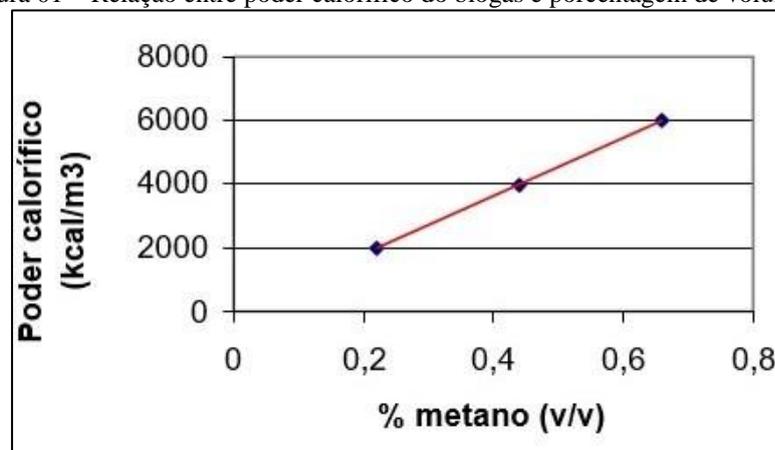
## 2 BIOGÁS

Desprezado entre os recursos energéticos o biogás sofre injustificáveis preconceitos, pois se origina do lixo, das fezes de animais, do esgoto, de poluentes; sempre visto como subproduto descartável. Bley JR, caracteriza o gás como sendo “um composto gasoso, constituído em média de 59% de gás metano ( $\text{CH}_4$ ), 40% de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) e de 1% de gases traço, entre eles o gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ )”.

### 2.1 Poder calorífico do biogás

O principal componente do biogás, quando se pensa em utilizá-lo como combustível, é o metano. Segundo PECORA (2006), a presença de substâncias não combustíveis no biogás, como água e dióxido de carbono, prejudica o processo de queima tornando-o menos eficiente uma vez que, presentes na combustão absorvem parte da energia gerada. A medida em que se eleva a concentração de impurezas, o poder calorífico do biogás torna-se menor.

Figura 01 – Relação entre poder calorífico do biogás e porcentagem de volume em metano



Fonte: Pecora, 2006.

O poder calorífico do biogás bruto é de cerca de  $6\text{kWh/m}^3$ , aproximadamente meio litro de óleo diesel, e o do gás purificado  $9,5\text{kWh/m}^3$ . O poder calorífico líquido, entretanto, depende da eficiência dos equipamentos empregados no uso energético do gás (COELHO et al, 2001). Um estudo feito por da SILVA (2012) mostrou que de acordo com a quantidade de metano no biogás o seu poder calorífico aumenta, pois o  $\text{CO}_2$ , o outro produto da digestão anaeróbia, é a forma mais oxidada do carbono, não podendo ser mais queimado.

Figura 02 – Equivalência energética de 1 Nm<sup>3</sup> de biogás

Combustível	Quantidade equivalente a 1 Nm <sup>3</sup> de biogás
Carvão Vegetal	0,8 kg
Lenha	1,5 kg
Óleo Diesel	0,55 L
Querosene	0,58 L
Gasolina Amarela	0,61 L
GLP (Gás Liquefeito de Petróleo)	0,45 L
kWh	1,43
Álcool Carburante	0,80 L
Carvão Mineral	0,74 kg

Fonte: Coelho, 2001.

### 3 ATERRO SANITÁRIO

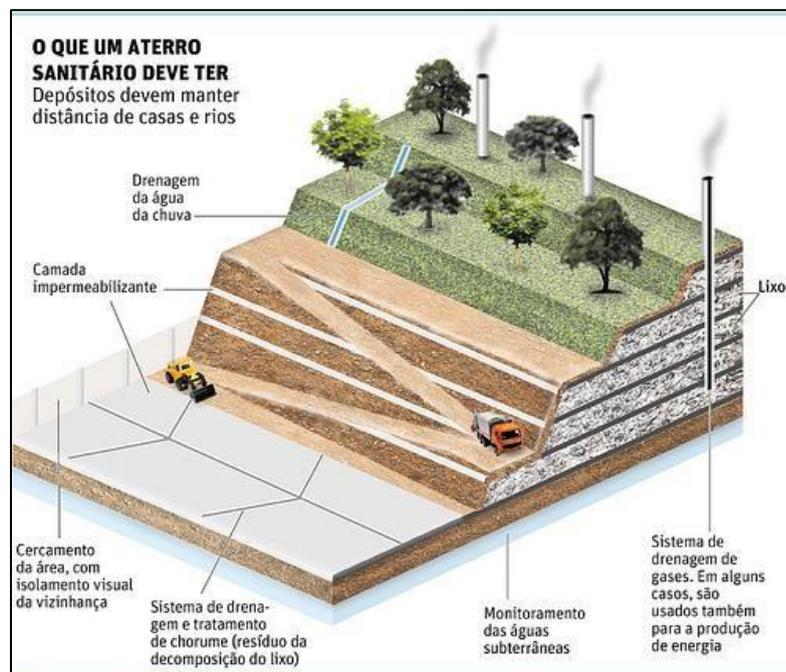
Segundo a NBR 8419 (ABNT, 1992), aterro sanitário é:

*“Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário” (ABNT, 1992).*

Os aterros sanitários são o meio mais utilizado e de menor custo para disposição final de resíduos sólidos. Os aterros estão expostos às ações da natureza, portanto encontram-se ativados os processos físicos, químicos e biológicos.

Os aterros sanitários são construídos com técnicas de disposição de resíduos, que garantem a coleta e o tratamento de gases e chorume, através de impermeabilização das áreas que receberão os resíduos, protegendo assim o solo e as águas subterrâneas e superficiais de seu entorno (ECOURBIS, 2016).

Figura 03 – Esquema de funcionamento de um aterro.



Fonte: Ecourbis (2016).

Segundo a NBR 8849 (ABNT, 1985), o aterro controlado é muito semelhante ao aterro sanitário em termos de estrutura. Na maioria dos casos, um aterro controlado é um antigo lixão

que foi remediado e recebeu cobertura de argila e grama, recursos para canalização de chorume e remoção dos gases produzidos, além de melhorar o recebimento de novos resíduos, submetendo-os a uma compactação adequada e recobrimento das células expostas.

Conclui-se que um projeto de aterro sanitário deve ser parte do gerenciamento integrado de resíduos sólidos, sendo que o planejamento para implantação da coleta seletiva, educação ambiental e redução de consumo são pontos essenciais a serem considerados na implantação desse tipo de empreendimento. A restrição ao uso de terra, a limitação da vida útil e as restrições impostas pela legislação farão com que haja mais dificuldade para a escolha por essa alternativa (GADELHA, 2008).

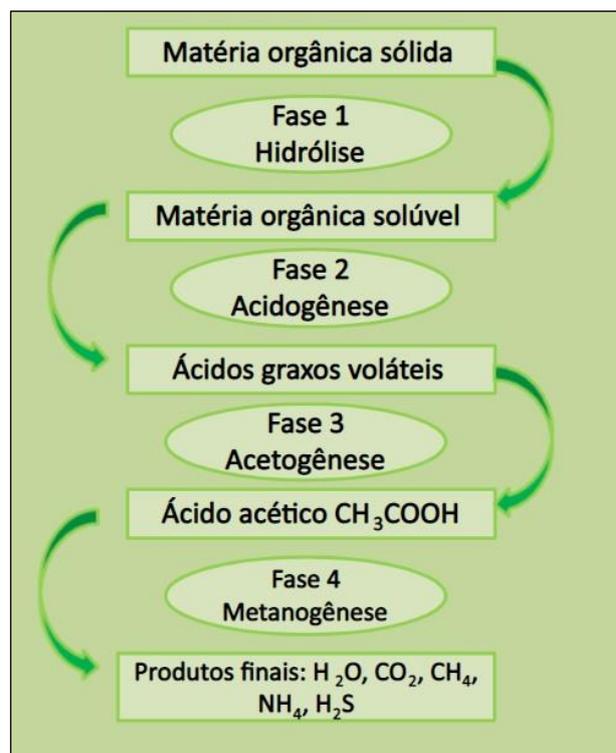
## 4 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

### 4.1 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um sistema de tratamento de resíduos indiferenciados. Este processo é dividido em duas fases: a mecânica, que são os meios de separação dos materiais recicláveis; e a biológica que estabiliza a fração orgânica, tornando o material útil para outra utilização. (COSTA, 2010).

A digestão anaeróbia é consequência de uma série de interações metabólicas entre vários grupos de microrganismos. Ela ocorre basicamente em quatro estágios: hidrólise/liquefação, acidogênese, acetogênese e metanogênese. (Leite, 2016).

Figura 04 – Fases da digestão anaeróbia



Fonte: Leite 2016

Os maiores objetivos quando há implantação de um sistema de digestão anaeróbia são: aumento da recuperação de materiais recicláveis, produção de composto e fertilizante para o solo, produção de material biologicamente estabilizado para aterro, produção de calor/energia elétrica. (COSTA, 2010).

As vantagens do sistema de digestão anaeróbia são: redução de orgânicos em aterro,

redução do volume e umidade de resíduos para acomodação final e principalmente redução da formação de gases efeito estufa. Desta forma a digestão anaeróbia de resíduos é uma alternativa que se compõe muito bem com a reciclagem. Segundo Souza (2012), a digestão anaeróbia não só favorece a diminuição de emissão dos principais gases que geram o efeito estufa e acarreta na produção de energia elétrica como também se destaca por outro aspecto de suma importância para a agricultura, o biofertilizantes.

Em relação a digestão anaeróbica são de extrema importância respeitar os parâmetros listados abaixo para o correto funcionamento do biodigestor, conseguindo assim produzir um biogás de qualidade.

- a) Alcalinidade
- b) Determinação da relação AI/AP
- c) Tempo de retenção hidráulica
- d) Carga orgânica volumétrica
- e) Relação COV x Temperatura

Diversos métodos, padronizados ou não, são encontrados na literatura para avaliação da cinética anaeróbia. Alguns têm foco na eficiência dos microrganismos, outros focam na degradabilidade do substrato em condições anaeróbicas, outros têm por objetivo avaliar o potencial bioquímico de metano (ou potencial energético) do substrato. Há também aqueles que avaliam a toxicidade de substâncias inibidoras no processo anaeróbio.

Figura 05 – Resumo dos métodos cinético anaeróbios

Sigla	Propósito e/ou aplicação
AME	Mensura a atividade específica de produção de metano em lodos anaeróbicos. Utilizado para efetuar comparações entre inóculos ou avaliar eficiências em reatores anaeróbicos
ISO 13.641	Ensaio de toxicidade anaeróbica. Baseia-se na medida da inibição da produção de biogás após três dias de incubação. Utilizado para avaliar a influência de compostos químicos diversos na digestão anaeróbia
ISO 11.734	Estima a degradação de substâncias orgânicas diversas pela medida da produção de biogás
ASTM E2170-01	Estima a degradação de substâncias químicas pela medida da produção de biogás e por análises químicas da concentração residual. Método reconhecido nos EUA
DIN 38.414-8	Mensura a degradação de lodos e efluentes por meio da medida da produção de biogás
VDI 4.630	Método para mensurar o PBB e PBM. Aplicado a diversos tipos de substratos, inclusive resíduos agropecuários e culturas agrícolas. Método reconhecido na Alemanha e países europeus

Fonte: Amaral

O sistema mais apropriado depende das características dos resíduos, da área disponível, dos recursos financeiros e operacionais, da importância da geração de energia para o sistema, da prevenção à poluição, entre outros fatores. Isso torna a digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos em reatores mais atrativa do que o beneficiamento da matéria orgânica em aterros sanitários, pois nessas unidades é possível potencializar a produção de biogás; além disso, tem-se um melhor controle operacional do processo, maior facilidade na captura do biogás e diminuição significativa da massa de resíduos dispostos nos aterros sanitários. (AMARAL).

O equilíbrio ecológico entre as espécies dentro do reator afetará diretamente o desempenho da biodigestão, que deverá ser mais favorável a microrganismos produtores de metano. Estas são as bactérias metanogênicas, que são sensíveis a diversas condições ambientais, destacando-se temperatura, pH, nutrientes e a presença de resíduos tóxicos (LIBÂNIO, 2002).

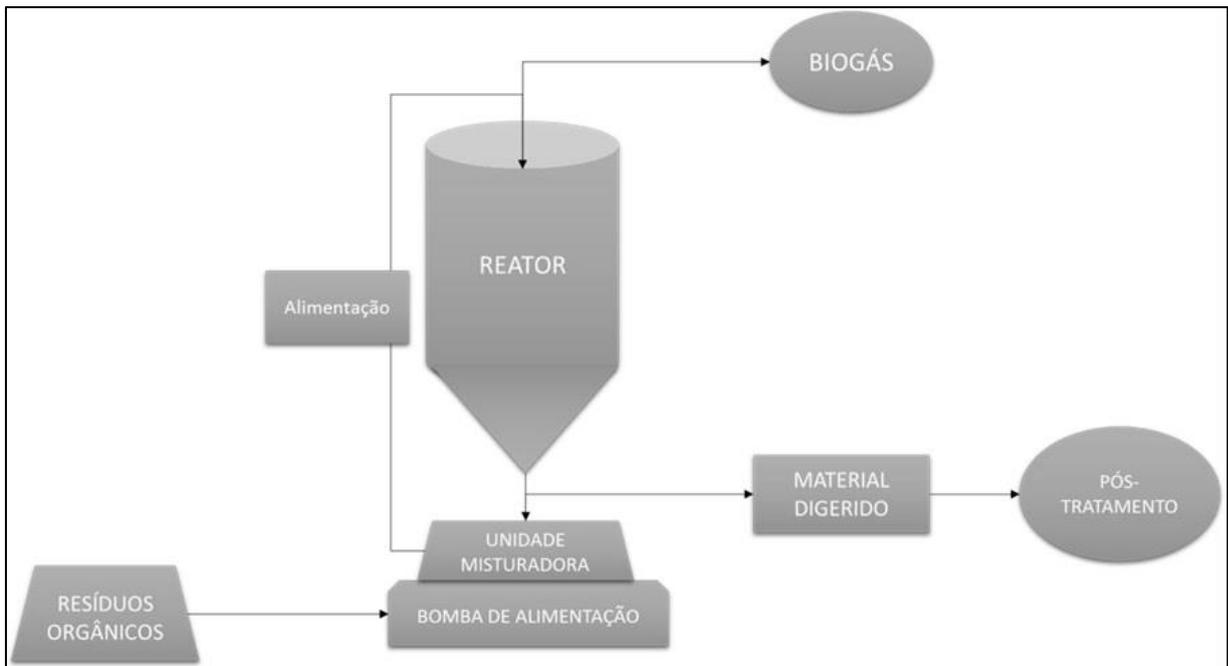
A temperatura é a variável mais importante para a seleção das bactérias que irão atuar dentro do reator. A digestão anaeróbia acontece em três condições de temperatura: psicrófila (abaixo de 20°C), mesófila (entre 20°C e 45°C) e termófila (entre 45°C e 70°C) (LETTINGA, 2001).

Os processos termofílicos, segundo Vindis (2009), são os que apresentam uma maior eficiência na remoção de matéria orgânica e uma maior geração de biogás. Entretanto, os processos mesofílicos são os mais adotados, pois não requerem um aquecimento externo e estão menos sujeitos a variações de temperatura.

O pH ótimo para crescimento da maioria das bactérias está entre 6,5 e 7,5. As variações máximas e mínimas, para a maior parte delas, estão entre pH 4 e 9. No entanto, quando cultivadas em meio controlado com um pH, é provável que esse pH se altere, podendo se tornar tanto ácido como alcalino (CAMPOS, 2006).

De acordo com Mayer (2013), o equilíbrio ácido-base nos reatores é atingido por concentrações elevadas de alcalinidade. Muitas vezes, deve ser suplementada uma fonte externa para fornecer estabilidade no processo. Nas fases de hidrólise e acidogênese são liberadas grandes quantidades de ácidos orgânicos voláteis, que se acumulam e podem causar diminuição do pH. Para que ocorra o efeito tampão é preciso manter a alcalinidade em concentrações adequadas (LOPES, 2002).

Figura 06 – Esquema do processo dranco



Fonte: Adaptado de De Baere (2010)

O processo dranco trabalha com diferentes tipos de resíduos, e tem um tempo de retenção médio de 20 dias. Sua alimentação é feita continuamente pelo topo do reator e o material digerido é retirado pelo fundo. O excesso de água é retirado e é necessária uma compostagem de 15 dias do material digerido. É um sistema vertical, que ocorre por gravidade e recirculação de massa sólida. A produção de biogás é da ordem de 100 a 200 m<sup>3</sup> por tonelada de resíduo e 50% é utilizado como consumo próprio.

## 4.2 Incineração

Entre os processos de tratamento térmico a alta temperatura, a incineração é o mais difundido, com número elevado de unidades em operação comercial em todo o mundo (CEMPRE, 2010), especialmente em países com pequena disponibilidade de área para aterro, como Japão e Suíça, sendo na Europa a França e a Alemanha os países com maior número de unidades. A quantidade de material resultante do processo de queima, quando comparada à quantidade original de resíduos, corresponde a valores compreendidos entre 12% e 30% em termos de massa e 4% e 10% em termos volumétricos (MACHADO, 2015).

A determinação da composição e conteúdo energético dos resíduos a ser incinerado é de fundamental importância para o dimensionamento correto da incineração e do sistema de

limpeza. O tempo necessário para a implantação de uma unidade de incineração de grande porte pode levar de 5 a 8 anos: 2 a 3 para definição do local e obtenção de licenças e 3 a 5 para construção (CEMPRE, 2010).

A incineração dos resíduos sólidos urbanos tem um processo de geração de energia elétrica semelhante às térmicas convencionas de ciclo Rankine e sua capacidade de geração depende de dois fatores: a eficiência da transformação do calor em energia elétrica e do poder calorífico do resíduo. Segundo Paro (2008), a incineração produz 4 vezes mais energia elétrica quando comparado ao aterro sanitário e emite dez vezes menos dióxido de carbono.

Em termos gerais, a tecnologia de incineração é constituída por unidades modulares de duplo estágio. O resíduo sólido urbano é introduzido na primeira câmara, onde ocorre o processo de combustão. Entre as temperaturas de 500°C e 900°C, alcança-se nesse primeiro módulo a vaporização de alguns compostos e a mudança dos resíduos não volatilizados em partículas muito pequenas. A relação entre a vazão de ar primário pré-aquecido e de ar secundário quente recuperado do próprio processo tende a ser da ordem de dois terços (MACHADO, 2015).

O gás gerado nessa câmara primária, a partir de no mínimo 850°C, é enviado para a câmara secundária, onde ocorre, de forma complementar, a queima do remanescente das partículas de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e cinzas. Esta 2ª etapa é operada numa temperatura superior, entre 750°C e 1250°C, com uma permanência curta. Nesta 2ª câmara, ocorre a oferta e a disponibilidade de oxigênio em excesso, de forma a propiciar atmosfera extremamente oxidante, e a sobre elevação da temperatura (HENRIQUES, 2004).

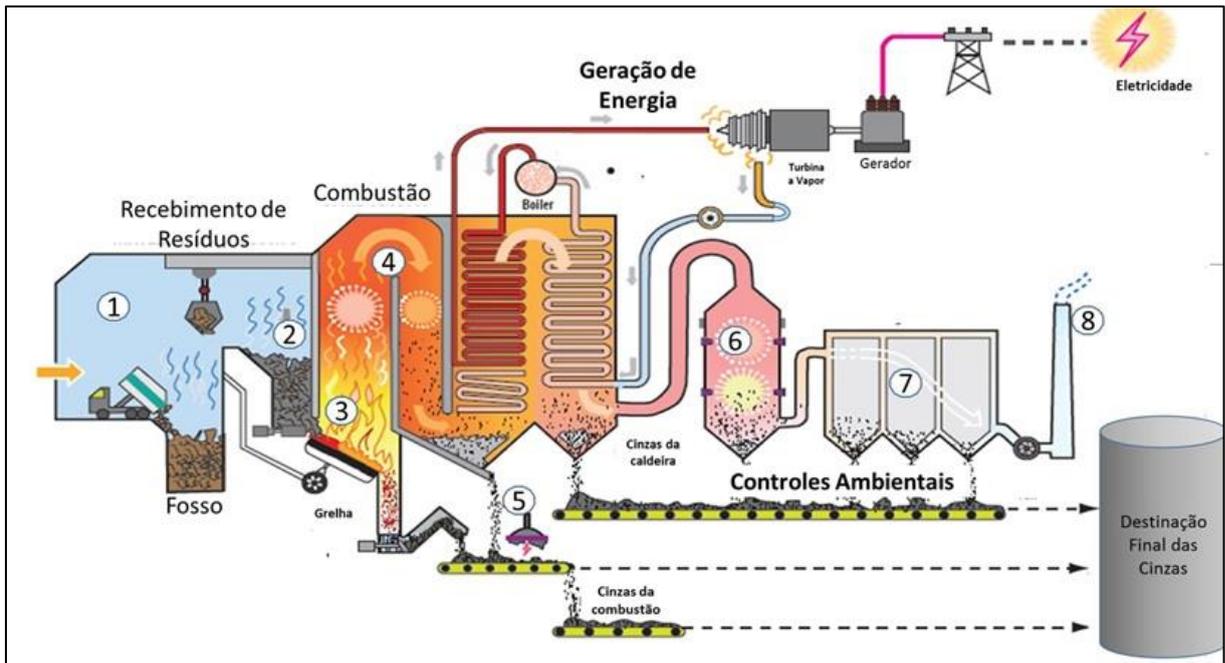
A incineração de resíduos transforma-os basicamente em três produtos: cinzas, gases da combustão e calor. As cinzas são em sua maioria formadas por constituintes inorgânicos que estavam presentes nos resíduos. Elas podem se aglomerar em nódulos sólidos (*bottom ash*) ou ser carregadas diretamente pelos gases da combustão (*fly ash*). Os gases da combustão necessitam de um tratamento adequado para reduzir a concentração de alguns poluentes gasosos presentes e para reduzir a quantidade de material particulado antes de serem despejados na atmosfera (SANTOS, 2011).

Segundo Coelho (2014), o processo de incineração é mais vantajoso em relação à destruição de resíduos hospitalares e remédios fora do prazo de validade, que poderiam ser prejudiciais à saúde. De acordo com Lemos (2013), as unidades de incineração de resíduos sólidos urbanos devem resolver, em primeiro lugar, os problemas relativos aos resíduos de serviço da saúde e só depois podem ser encarados os sistemas de produção de energia.

Outro impacto ambiental a ser considerado é a formação de lixiviados, que ocorre

principalmente no compartimento de armazenamento de resíduo sólido urbano bruto, fosso, devido à umidade natural e ao processo de degradação anaeróbia da matéria orgânica. Os lixiviados devem ser continuamente removidos e encaminhados ao tratamento (ABRELPE, 2012).

Figura 07 – Processo de incineração



Fonte: Adaptado de Need 2015

Na primeira etapa o resíduo é descarregado no fosso (1), onde através de garras alimenta as moegas (2); da moega o resíduo alimenta o incinerador (3), que opera em temperatura elevada; o calor produzido pela queima dos resíduos alimenta uma caldeira (4), que por sua vez gera o vapor que é conduzido para um sistema turbina-gerador, para geração de eletricidade. No incinerador, sobre as grelhas restam as cinzas (5), que passam por separadores eletromagnéticos. Os gases contaminados passam por um sistema de tratamento para remoção dos poluentes (7) e finalmente são lançados ao ambiente através da chaminé (8) (ENGENBIO, 2010).

Uma planta de incineração deve tratar de forma especial os lodos, cinzas e descargas dos sistemas de limpeza de gás de combustão e da água, que são considerados resíduos perigosos, mesmo que contenham apenas pequenas quantidades de compostos orgânicos e metálicos. As cinzas volantes e os lodos devem ser tratados e dispostos em um aterro adequado (ENGENBIO, 2010).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No ano de 2010 foi aprovada a Lei nº 12.305, a qual estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), definindo um novo paradigma na gestão de resíduos sólidos no país. Entre as mudanças apresentadas, uma das mais relevantes é a exclusividade de destinação de apenas “rejeitos” aos aterros sanitários, sendo os “rejeitos” entendidos como os resíduos que não mais apresentam possibilidade de tratamento. Estabeleceu-se, assim, uma hierarquia para produção e destinação de resíduos, priorizando-se, por ordem: (i) a não geração; (ii) a redução; (iii) a reutilização; (iv) a reciclagem; (v) o tratamento; e deixando por último, ou seja, apenas para os ditos “rejeitos”, o item (vi), correspondente à disposição final em aterro sanitário.

Para comprovar através deste estudo qual maneira de produção de biogás é mais viável, foi analisado fatores como: valores de investimento; atendimento a PNRS; emissões de gases de efeito estufa, e impactos sociais.

### 5.1 Análise quanto ao valor de investimento

Os dois processos necessitam de tecnologia para melhor aproveitamento do gás resultante. Apesar da condição anaeróbia acontecer naturalmente em muitas regiões, não há possibilidade de confinar esse gás criado de maneira natural sem antes ter um projeto desenvolvido.

O quadro 01 traz o valor de investimento para implementação em aterro sanitário de um sistema de incineração e de um sistema de digestão anaeróbia, ambos sendo implantados para trabalhar com uma quantidade de 27 mil toneladas de resíduos por dia. O quadro também mostra o custo operacional de cada sistema anualmente.

Quadro 01 – Comparação entre os custos de investimento e operacionais

<b>Tecnologia</b>	<b>Investimento (R\$ milhões)</b>	<b>Custo operacional (R\$ milhões/ano)</b>
<b>Incinerador</b>	R\$ 160	R\$ 44,6
<b>Biodigestor</b>	R\$ 139,2	R\$ 25

Fonte: Elaboração própria com dados do DRANCO (2014), EMAE (2011).

## **5.2 Atendimento as normas PNRS**

O quadro abaixo apresenta uma análise comparativa entre as duas alternativas quanto ao atendimento às normas da PNRS, que é um marco na legislação brasileira. Para estruturar essa comparação foram analisados e comparados os principais artigos da referida lei no tocante a cada uma dessas tecnologias.

Quadro 02 – Análise de atendimento à PNRS

<b>Aspecto PNRS</b>	<b>Incinerador</b>	<b>Biodigestor</b>
Redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos (PNRS, Art. 7º V)	Aumento da necessidade de Aterros Classe I devido à geração de rejeitos perigosos.	Não gera resíduos perigosos, apenas rejeitos para aterros classe IIA, se inviável comercialização do composto.
Incentivo à indústria da reciclagem e das metas numéricas fixadas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, Art. 7º VI, Art. 30 II e V)	Reciclagem de metal e vidro. Plásticos, papel e madeira são necessários para obtenção de potencial calorífico mínimo.	Reciclagem de resíduos secos é condição necessária para processo eficiente.
Reconhecimento dos resíduos como bem econômico gerador de trabalho e renda, com priorização de cooperativas e outras formas de associação de catadores de materiais (PNRS, Art. 6º VIII, Art. 36 §1º)	1 emprego a cada 10 mil toneladas processadas ao ano	35 empregos a cada 10 mil toneladas processadas ao ano
Respeito à ordem de prioridade dos processos na gestão e gerenciamento (PNRS, Art. 9º)	Políticas de incentivo à redução, reutilização e reciclagem alteram o volume e podem inviabilizar a escala operacional mínima do incinerador. Não acompanha a ordem de prioridade.	Acompanha a ordem de prioridade por necessitar da separação de resíduos secos para o bom desempenho.

Fonte: Adaptado de Via Pública (2012).

### 5.3 Emissões de gases de efeito estufa

Em termos de emissão de gases de efeito estufa, o que se verifica é que as duas alternativas possuem vantagens quando comparadas ao aterro sanitário. Entretanto, a alternativa da digestão anaeróbia é mais vantajosa, pois ela emite quase cinco vezes menos que a incineração, conforme ilustrado no quadro 03 que resume a comparação entre essas duas rotas tecnológicas.

Quadro 03 – Emissões evitadas pelas alternativas

<b>Alternativa</b>	<b>Redução de emissão por tonelada de RSU (tCO2 eq.)</b>	<b>Emissões evitadas pela reciclagem e geração térmica substituída</b>	<b>Total</b>
Incinerador	0,209	0,034	0,243
Biodigestor	1,064	0,084	1,148

Fonte: EMAE (2011).

No quadro 04, é demonstrada a comparação entre o balanço energético das alternativas, onde são considerados a conservação de energia referente à reciclagem de material e a produção de energia no ano.

Quadro 04 – Balanço energético das alternativas

<b>Alternativa</b>	<b>Produção de energia (GWh/ano)</b>	<b>Conservação de energia pela reciclagem (GWh/ano)</b>	<b>Benefício energético (GWh/ano)</b>
Incinerador	100,2	10,3	110,2
Biodigestor	26,2	248,0	274,3

Fonte: EMAE (2011).

### 5.4 Efeitos sociais

Os catadores de materiais recicláveis constituem a base da cadeia produtiva da reciclagem. Segundo o CEMPRE (2011), 90% de todo o material reciclável coletado no Brasil é

recuperado pelos catadores. O Movimento Nacional de Catadores de Materiais Recicláveis (MNCR) estima que exista em todo o Brasil mais de 800 mil catadores. Trata-se, portanto, de uma atividade que envolve uma quantidade expressiva de mão de obra.

Assim, sabe-se que qualquer que seja a alternativa a ser escolhida, ela deve contemplar essa realidade brasileira. Observa-se que ela é bem diferente daquela dos países desenvolvidos, onde essas tecnologias vêm operando com maior intensidade. No caso da digestão anaeróbia, não dá para considerar que as receitas com os materiais recicláveis sejam destinadas totalmente ao empreendedor sem levar em conta o impacto que isso teria no retorno dos catadores e nos postos de trabalho das pessoas envolvidas com reciclagem.

O que se torna mais grave no caso da incineração é que ela depende desse material para uma maior eficiência. Com efeito, projetos que usam essa rota tecnológica concorrem diretamente pelo mesmo material que é também valorizado pelos catadores.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O biogás possui diversas aplicações de caráter energético. Dentre suas aplicações destacam-se o uso do biogás em aquecedores a gás para produção de água quente para condicionamento ambiental ou para calor de processo, uso para secagem de grãos em propriedades rurais, secagem de lodo em ETE's, queima em caldeiras, no aquecimento de granjas e de porcos, uso veicular, cocção, iluminação a gás, entre outros.

No estudo apresentado foi proposto duas tecnologias como solução para os problemas encontrados nos aterros sanitários como: o volume de lixo, poluição visual, vazamento de gases e líquidos nocivos, abrigo de transmissores de doenças como ratos e moscas, entre outros.

A primeira proposta trata-se de transformar o resíduo sólido urbano em biogás através da digestão anaeróbia, onde o resíduo passa por uma série de processos que na ausência de gás oxigênio e degradado por microrganismos, gerando assim biogás e matéria que pode ser utilizada para fertilização do solo. A segunda opção é o sistema de incineração dos resíduos, onde todo o conteúdo do aterro é queimado. Essa técnica pode ser utilizada para eliminação de resíduos de alta periculosidade como lixo hospitalar. Ao final do processo além de energia, também são gerados gases tóxicos que necessitam tratamento e cinzas.

Ao final do estudo, fica visível que as tecnologias de digestão anaeróbia e de aproveitamento do biogás têm-se revelado eficazes no tratamento e valorização de resíduos e na mitigação do efeito estufa, com baixo custo de operação, possibilitando ainda a produção de energia elétrica, evitando custos ambientais correspondentes às fontes convencionais.

Observou-se, que a tecnologia da incineração é uma forma de se dar uma resposta rápida quanto ao volume de resíduos gerado. Há, porém, grandes controvérsias a respeito dela. A primeira diz respeito à geração de dioxinas e furanos, compostos tóxicos, pois não há consenso entre a sociedade civil sobre os limites seguros de emissão desses poluentes. A segunda controvérsia quanto à incineração diz respeito à adoção de um processo que depende da geração de resíduos, inclusive os recicláveis. Assim, políticas públicas que incentivam a redução e a reciclagem tendem a reduzir os volumes a serem incinerados e, conseqüentemente, o retorno econômico da adoção dessa tecnologia.

Ressalta-se, por fim, como resultado da reflexão aqui empreendida, que, além dos aspectos econômicos, os aspectos ambientais, sociais e culturais também são determinantes na tomada de decisão por uma opção tecnológica adequada. Portanto antes de qualquer investimento, recomenda-se que o responsável pela gestão elabore programas de educação ambiental, com a finalidade de haver maior compreensão, engajamento e cooperação da

sociedade civil aos projetos que deverão lidar com os resíduos sólidos urbanos. Como ressaltou Grimberg (2007), essa atitude irá corroborar com a criação de programas que visam a não geração, a mudança do estilo e padrão de consumo e o incentivo pela aquisição de materiais recicláveis, o que permitirá maiores avanços no mercado da reciclagem e potencializará a efetividade da inclusão social.

## REFERÊNCIAS

- ALUANI, Andréa Barbin. **Estudo de impacto ambiental e relatório de impacto ambiental da usina de recuperação de energia**. Barueri: SGW Services, 2012.
- AMARAL, André; STEINMTZ, Ricardo; KUNZ, Airtton. **Parâmetros de importância ao progresso de digestão anaeróbia**, 2019. Cap. 2, pág. 27-32. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1109211/1/final9155.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2019.
- AMARAL, Fernando Merli. **Biodigestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos: um panorama tecnológico atual**. 2004. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, São Paulo, 2004.
- AQUINO, S. F. et al. Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (AME) em lodos anaeróbios. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 192–201, jun. 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419/1992**: Apresentação
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8849/1985**: Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1985.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E2170-01**: standard test method for determining anaerobic biodegradation potential of organic chemicals under methanogenic conditions. West Conshohocken, Pensilvânia, 2001. 5 p.
- BLEY, Cícero Jr. **Biogás a energia invisível**, 2018. Disponível em: <[https://www.ambienteenergia.com.br/wp-content/uploads/2018/09/Biogas\\_Ebook\\_Ambiente-Energia.pdf](https://www.ambienteenergia.com.br/wp-content/uploads/2018/09/Biogas_Ebook_Ambiente-Energia.pdf)>. Acesso em: 12 out. 2019.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Combustíveis fósseis são maiores responsáveis pelo efeito estufa**. 2019. INFORMMA-4125. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/informma/item/4125-combustiveis-fosseis-sao-maiores-responsaveis-pelo-efeito-estufa>>. Acesso em: 10 out. 2019.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano nacional de resíduos sólidos** – versão preliminar para consulta pública. Brasília: MMA, 2011. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/253/\\_publicacao/253\\_publicacao02022012041757.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_publicacao/253_publicacao02022012041757.pdf)>. Acesso em: 10 set. 2019.
- CAMPOS, Cláudio Milton Montenegro *et al.* Development and operation of an upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB) treating liquid effluent from swine manure in laboratory scale. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, n. 1, p. 140-147, 2006.
- CASSINI, SÉRVIO TÚLIO. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rede cooperativa de pesquisas. Vitória/ES, 2003. Disponível em: <<https://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/ProsabStulio.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2019.

- COELHO, M.; SOUZA, J.; SCHAEFFER, L; ROSSINI, E. G. Study on the economic viability of hi-tech biogas plants. **Revista Espacios**. v. 35, n. 30, 2014. p. 02. Disponível em: <<http://www.revistaespacios.com/Caracas – Venezuela>>, 03/2014. Acesso em: 10 nov. 2019.
- COELHO, S.T.; VELÁZQUEZ, S.M.S.G.; SILVA, O.C.; VARKULYA JR. A.; PECORA, V. (2003a). **Biodigestor Modelo UASB**. V. Relatório de Acompanhamento. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. São Paulo, 2003.
- COSTA, João Pedro Fidalgo da. **Tratamento mecânico e biológico de resíduos sólidos urbanos**: avaliação do seu potencial para a recuperação de materiais recicláveis. 2010. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa, 2010.
- DAMODARAN, Aswath. **Investment valuation**: tools and techniques for determining the value of any asset. John Wiley & Sons, 2012.
- DE BAERE, Luc. **The dranco technology**: a unique digestion technology for solid organic waste. Organic Waste Systems (OWS). Belgium: Pub. Brussels, 2010.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 384140-8** German standard method for the examination of water, waste water and sludge. Sludge and sediment (group S). Determination of amenability to anaerobic digestion (S8), 1985.
- DODMAN, D. Blaming cities for climate change? An analysis of urban greenhouse gases emissions inventories. **Environment and Urbanization**, v. 21, n. 1, p. 185-201, 2009.
- ECOURBIS AMBIENTAL, 2019. Disponível em:<<http://www.ecourbis.com.br/site/destinacao.aspx?content=aterro-sanitario>>. Acesso em: 10 nov. 2019.
- EMPRESA METROPOLITANA DE ÁGUAS E ENERGIA. Relatório de acompanhamento. Avaliação de ciclo de vida (ACV) comparativa entre tecnologias de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos. **Projeto P&D EMAE/ANELL 0393-00611**, 2011.
- ENGEBIO ENGENHARIA S/S LTDA. **Estado da arte do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica**. 2. ed. Porto Alegre: ENGEBIO, 2010.
- ESTUDO de alternativas de tratamento de resíduos sólidos urbanos: incinerador *mass burn* e biodigestor anaeróbico – subsídios técnicos à elaboração dos planos locais de gestão dos resíduos sólidos. Via Pública, 2012.
- GRIMBERG, Elisabeth; TUSZEL, Luciana; GOLDFARB, Yamila. **Gestão sustentável de resíduos sólidos e inclusão social**: estudo de caso sobre as cooperativas das centrais de triagem do programa coleta seletiva solidária da cidade de São Paulo. São Paulo: Instituto Polis, 2004.
- GRIPP, W. G. **Aspectos técnicos e ambientais da incineração de resíduos sólidos urbanos**: considerações sobre a proposta para São Paulo. São Carlos: 1998. 208 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

HENRIQUES, R.M. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica.** 2004. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, COPPE, 2004.

HESSAMI, Mir-Akbar; CHRISTENSEN, Sky; GANI, Robert. Anaerobic digestion of household organic waste to produce biogas. **Renewable energy**, v. 9, n. 1, p. 954-957, 1996.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11734** - Water quality - Evaluation of ultimate anaerobic biodegradability of organic compounds in digested sludge - Method by measurement of biogas production, 1995.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13641-1.** Water quality - Determination of inhibition of gas production of anaerobic bacteria. General test., 2003.

JACOBI, Pedro Roberto; BESEN, Gina Rizpah. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estudos Avançados**, v. 25, n.71, p. 135-158, 2011. ISSN 0103-4014. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142011000100010>>. Acesso em: 11 ago. 2019

LEITE, Clauber Barão. **Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos com Aproveitamento Energético: Avaliação Econômica entre as Tecnologias de Digestão Anaeróbia e Incineração** 2016. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

LETTINGA, Gatzke; REBAC, Salih; ZEEMAN, Grietje. Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment. **Trend in Biotechnology**, v. 19, n. 9, p. 363-370, 2001.

LIBÂNIO, Paulo Augusto Cunha. **Avaliação da eficiência e aplicabilidade de um sistema integrado de tratamento de resíduos sólidos urbanos e de chorume.** Belo Horizonte, 2002.

LOPES, Wilton Silva *et al.* Influência da umidade na digestão anaeróbia de resíduos sólidos. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, MACHADO, Camila Frankenfeld. **Incineração: uma análise do tratamento térmico dos resíduos sólidos urbanos de Bauru/Sp.** 2015. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro 2015.

MANYIKA, James; et al. **Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy.** 2013. Disponível em: <<http://www.mckinsey.com/business-functions/digital-mckinsey/our-insights/disruptive-technologies>>. Acesso em 03 de set. de 2019.

MASTERGEO Engenharia. **Como funciona um aterro sanitário e a que tipo de resíduos se direciona?** 2019. Disponível em:<<http://mastergeoengenharia.net/como-funciona-um-aterro-sanitario-e-a-que-tipo-de-residuos-se-direciona/>>. Acesso em: 15 ago. 2019.

MAYER, Mateus Cunha *et al.* **Estudo da influência de diferentes inóculos no tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos,** 2013. Disponível em:<<http://tede.bc.uepb.edu.br/jspui/bitstream/tede/1859/1/PDF%20-%20Mateus%20Cunha%20Mayer.pdf>>. Acesso em 15 nov. 2019.

MENEZES, Ricardo A. Amaral; GERLACH, José Luiz; MENEZES, Marco Antônio. Estágio Atual da Incineração no Brasil. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA, 7., 2000, Curitiba. **Anais**. Disponível em :<<http://www.resol.com.br/textos/Estado%20Atual%20da%20Incineracao%20no%20Brasil.htm>>. Acesso em: 14 ago. 2019.

OLIVEIRA, L. B.; ROSA, L. P. Brazilian waste potential: energy, environmental, social and economic benefits. **Energy Policy**. v. 31, p.1481-1491, 2003.

OSTREM, Karena *et al.* **Greening waste**: anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes. Earth Engineering Center Columbia University, 2004. p. 6-9.

PARO, A. C., COSTA, F. C., COELHO, S. T. Estudo comparativo para o tratamento de resíduos sólidos urbanos: aterros sanitários x incineração. **Revista Brasileira de Energia**, v.14, n. 2, p. 113-125, 2008.

PAVAN, Margareth de Cassia Oliveira. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos**: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo: USP, 2010.

PECORA, Vanessa. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP - estudo de caso**. 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em:<<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp008533.pdf>>. Acesso em: 14 setembro 2019.

PEREIRA, Ruan Carlos Alves; BARROS, Carlos Frederico; IGNACIO, Anibal Alberto Vilcapoma. Modelo de localização hierárquica de usinas de pirólise. **Blucher Marine Engineering Proceedings**, v. 1, n. 1, p. 582-593, 2014.

RAPOSO, F. *et al.* Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: an overview relating to methane yields and experimental procedures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 861-877, 2012.

REICHERT, Geraldo Antônio. III-242 – Aplicação da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos: uma revisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande/MS. **Anais**. Campo Grande, 2005. p. 18-23.

SILVA, GARDÊNIA AZEVEDO. **Estimativa da geração de biogás no aterro sanitário metropolitano de João Pessoa através do teste BMP**. Dissertação (mestrado). João Pessoa/PB. 2012.

SOUZA, José; PELEGRINI, Leandro; MOTTA, Clayton André Oliveira, COELHO, Mário Augusto Alexandre, SCHAEFFER, Lirio. **Tratamento de resíduos urbanos, geração de energia e fertilizante: uma perspectiva para a região do Vale dos Sinos**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 3., 2012, Bento tratamento de resíduos sólidos. **Revista brasileira de gestão ambiental**. Mossoró – RN – Brasil. v. 2, n.1, p. 06-10, jan./dez. 2008.

**VDI. VDI 4630 - Fermentation of organic materials characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests.** Verein Deutscher In-Genieure, 2006.

VINDIS, P. *et al.* The impact of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion on biogas production. **Journal of achievements in materials and manufacturing Engineering**, v. 36, n. 2, p. 192-198, 2009.