

UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC

CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

VITOR DE BRIDA

**IDENTIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS E
POTENCIAL ENERGÉTICO PARA O ATERRO SANITÁRIO DO CIRSURES –
ESTUDO DE CASO**

CRICIÚMA

2014

VITOR DE BRIDA

**IDENTIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS E
POTENCIAL ENERGÉTICO PARA O ATERRO SANITÁRIO DO CIRSURES –
ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Engenharia Ambiental para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental na Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC.

Orientador: Prof. Dr. Elidio Angioletto.

CRICIÚMA

2014

VITOR DE BRIDA

**IDENTIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS E
POTENCIAL ENERGÉTICO PARA O ATERRO SANITÁRIO DO CIRSURES –
ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela Banca Examinadora para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental no Curso de Engenharia Ambiental da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, com linha de pesquisa em Energia, Sociedade e Meio Ambiente.

Criciúma, 25 de Novembro de 2014

BANCA EXAMINADORA

Prof. Elidio Angioletto – Doutor – UNESC - Orientador

Prof. Mário Ricardo Gadagnin – Mestre - UNESC

Prof. Michael Peterson – Doutor - UNESC

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a toda minha família, principalmente meu pai e minha mãe por todo apoio e dedicação que tiveram por mim.

Quero também agradecer a todos os meus amigos, sejam os que estão perto e os que estão distantes de mim, por todos os momentos alegres que me proporcionaram ao longo da minha vida.

Mencionar também meu supervisor de campo Thiago Maragno Biava, meu outro chefe Lindomar Caciatore Junior e todos os profissionais do Cirsures, os quais cooperaram para a concretização deste trabalho.

Particularmente, agradecer meu orientador Elidio Angioletto por ter aceitado este desafio e sempre estar à disposição para poder aconselhar-me ao longo deste semestre.

E juntamente a isso, agradecer aos profissionais Michael Peterson e Mario Ricardo Guadagnin por aceitarem fazer parte da banca examinadora do meu Trabalho de Conclusão de Curso.

“Lute com determinação, abrace a vida com paixão, perca com classe e vença com ousadia, porque o mundo pertence a quem se atreve e a vida é muito bela para ser insignificante.”

Charles Chaplin

RESUMO

O aterro sanitário do Cirsures recebe os resíduos sólidos urbanos de sete municípios da região Sul de Santa Catarina, sendo eles Cocal do Sul, Lauro Müller, Morro da Fumaça, Orleans, Siderópolis, Treviso e Urussanga. O processo consiste na recepção dos caminhões advindos dos municípios integrantes do consórcio, esses caminhões passam primeiramente por um processo de pesagem e em seguida depositam os resíduos sólidos no aterro sanitário formando os taludes. Atualmente, o aterro sanitário não apresenta um sistema de aproveitamento do biogás gerado, o mesmo é queimado na saída dos drenos instalados ao longo dos taludes do aterro. O trabalho buscou realizar um estudo para o possível aproveitamento deste biogás emitido, de forma a quantificar o seu potencial com vistas a geração de energia elétrica e poder estimar o número de residências que serão atendidas na possibilidade de instalação de uma usina de biogás. A metodologia apresentada consiste nas análises dos resíduos sólidos que são dispostos e do biogás que é emitido no aterro sanitário, juntamente com a avaliação do potencial energético deste biogás emitido tanto para a finalidade de abastecimento residencial, quanto para outros fins, e do número de residências que poderiam ser atendidas. Com base nessas análises, foi concluído que o aterro sanitário tem um potencial de produção de energia térmica de $1,86 \times 10^7$ kWh/mês. Esse resultado foi encontrado a partir da análise com o coletor Isocinético de poluição do ar, essa amostragem realizada no aterro sanitário ocorreu em condições climáticas úmida e chuvosa, onde acaba minimizando a eficiência na decomposição dos resíduos sólidos e geração de gás metano, causando alteração nos dados obtidos. Utilizando esse biogás para a geração de energia elétrica a partir da implantação de uma usina de energia, o aterro sanitário será capaz de produzir $6,9 \times 10^4$ kWh/mês e atender mensalmente até 345 residências no município de Urussanga. As dificuldades encontradas acerca deste trabalho estão nas análises *in loco* do gás metano emitido no aterro sanitário, sendo impossível realizar essa amostragem devido as condições climáticas desfavoráveis, vazão baixa do gás metano e prazo de instalação do cromatógrafo no período proposto para a realização das análises, sendo necessário utilizar valores com base em outras metodologias referenciadas neste trabalho, impossibilitando um valor real absoluto para o número de residências atendidas.

Palavras-Chave: Aterro Sanitário, Resíduos Sólidos, Gás Metano, Biogás, Energia Elétrica.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Gráfico da relação em percentual da disposição final dos resíduos sólidos no Brasil nos períodos de 2000 e 2008..... | 20 |
| Figura 2 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos no Brasil na década de 2000. | 22 |
| Figura 3 - Composição do Biogás em aterros sanitários do Brasil. | 23 |
| Figura 4 - Sistema de coleta de gás gerado em aterros sanitários..... | 25 |
| Figura 5 - Equivalência energética do Biogás comparado a outros tipos de combustíveis. | 26 |
| Figura 6 - Percentual dos setores energéticos vigentes no Brasil no ano de 2010. | 30 |
| Figura 7 - Processo de chegada e disposição final dos resíduos sólidos domiciliares no aterro sanitário do Cirsures. Figura A – Balança de pesagem. Figura B – Anotação dos valores. Figura C – Destinação final..... | 40 |
| Figura 8 - Dreno de gás metano queimando de forma contínua. | 41 |
| Figura 9 - Localização dos drenos de gás metano no aterro sanitário do Cirsures. | 42 |
| Figura 10 - Procedimentos de montagem do equipamento para a análise do gás emitido no aterro sanitário do Cirsures. Figura A – Instalação da chaminé no dreno de gás metano. Figura B – Montagem do equipamento de análise do gás. Figura C – Marcação dos pontos onde serão coletados os dados dentro da chaminé. Figura D – Implantação da boquilha através da sonda dentro do flange da chaminé. Figura E – Coleta e análise do gás metano emitido no dreno do aterro sanitário. | 44 |
| Figura 11 - Fuga de gás metano no aterro sanitário do Cirsures. | 46 |
| Figura 12 - Composição gravimétrica global dos RSU presentes no aterro sanitário do Cirsures no período de 2012. | 47 |
| Figura 13 - Princípio de funcionamento do cromatógrafo para análise de gases através da cromatografia..... | 74 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Estimativa da quantidade de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos coletados no Brasil nos períodos de 2000 e 2008. (1) | 18 |
| Tabela 2 - Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos encaminhados para diferentes formas de destinação final no Brasil nos períodos de 2000 e 2008. | 19 |
| Tabela 3 - Tempo de decomposição dos resíduos nos aterros sanitários. | 21 |
| Tabela 4 - Quantidade característica de resíduos sólidos coletados no Brasil no período de 2008. | 22 |
| Tabela 5 - Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do lixo segundo IPCC, 2006. | 34 |
| Tabela 6 - Fator de correção de metano para as condições do aterro conforme o IPCC, 2006..... | 36 |
| Tabela 7 - Quantidade de resíduos que chegam ao aterro sanitário do Cirsures nos períodos de 2007 a 2014, em (ton/mês)..... | 39 |
| Tabela 8 - Características físico-químicas do gás metano composto no biogás do aterro sanitário do Cirsures, 2014. | 42 |
| Tabela 9 - Características físicas do gás metano no aterro sanitário do Cirsures, 2014. | 45 |
| Tabela 10 - Quantidade média de resíduos orgânicos e inorgânicos presentes no aterro sanitário do Cirsures entre os períodos de 2007 a agosto de 2014. . | 48 |
| Tabela 11 - Geração de metano e biogás no aterro sanitário do Cirsures de acordo com os períodos de disposição dos resíduos sólidos em 2004 a 2014. | 57 |

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valores de k conforme a zona onde situa-se os resíduos sólidos. 52

LISTA DE ABREVIATURAS

- ABLP – Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
- CIPA – Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos
- CIRSURES – Consórcio Intermunicipal de Resíduos Sólidos Urbanos da Região Sul
- DATASUS – Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde
- EFLUL – Empresa Força e Luz de Urussanga Ltda.
- FNMA – Fundo Nacional do Meio Ambiente
- GMBH – Gesellschaft Mit Beschränkter Haftung
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- ICLEI – International Council for Local Environmental Initiatives
- IEA – International Energy Agency
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
- MMA – Ministério do Meio Ambiente
- PIGIRS – Plano Intermunicipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
- PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
- RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
- SISNAMA – Sistema Nacional do Meio Ambiente
- SNVS – Sistema Nacional de Vigilância Sanitária

LISTA DE SIGLAS

°C – Graus Celsius

atm – Atmosfera

cal - Calorias

g - Gramas

kcal – Quilo Calorias

kg – Quilogramas

kVA – Quilo Volts-Ampere

kW – Quilo Watts

kWh – Quilo Watts Hora

m³ - Metros Cúbicos

mmHG – Miligramas de Mercúrio

MW – Mega Watts

MWh – Mega Watts Hora

Nm³ - Normal Metros Cúbicos

Ton - Toneladas

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 16 |
| 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS..... | 16 |
| 2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL..... | 17 |
| 2.2.1 Composição Dos Resíduos Sólidos | 21 |
| 2.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO GÁS METANO..... | 23 |
| 2.3.1 Cálculos da Geração de Gás Metano | 26 |
| 2.3.2 Trabalhos Desenvolvidos com o Gás Metano | 27 |
| 2.4 CRÉDITOS DE CARBONO..... | 28 |
| 2.5 INCENTIVOS GOVERNAMENTAIS..... | 29 |
| 2.6 NECESSIDADE DESSAS NOVAS TECNOLOGIAS | 31 |
| 3 METODOLOGIA | 32 |
| 3.1 QUANTIDADE DE RESÍDUOS QUE CHEGAM AO ATERRO SANITÁRIO | 32 |
| 3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO GÁS PRODUZIDO NO ATERRO SANITÁRIO | 32 |
| 3.3 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA DOS RESÍDUOS GERADOS | 32 |
| 3.4 CAPACIDADE ENERGÉTICA DO GÁS METANO PRODUZIDO NO ATERRO SANITÁRIO | 33 |
| 3.5 POTENCIAL DE ENERGIA EM KW QUE SERÁ PRODUZIDA | 36 |
| 3.6 NÚMERO DE RESIDÊNCIAS A SER ATENDIDAS | 37 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 39 |
| 4.1 PESAGEM DOS RESÍDUOS SÓLIDOS | 39 |
| 4.2 ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DO GÁS GERADO | 40 |
| 4.3 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA DOS RESÍDUOS..... | 46 |
| 4.2.1 Balanço De Massa | 46 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.2 Balanço de Energia | 48 |
| 4.4 POTENCIAL ENERGÉTICO DO GÁS METANO | 50 |
| 4.4.1 Cálculo do Potencial Energético do Gás Metano Estimado | 50 |
| 4.4.2 Cálculo do Potencial Energético do Gás Metano Mensurado | 53 |
| 4.5 POTENCIAL DE ENERGIA PRODUZIDA | 57 |
| 4.5.1 Cálculo da Energia Disponível Estimada | 57 |
| 4.5.2 Cálculo da Energia Disponível Real..... | 59 |
| 4.6 NÚMERO DE RESIDÊNCIAS ATENDIDAS..... | 60 |
| 4.6.1 Cálculo do Número de Residências Atendidas - Estimado | 60 |
| 4.6.2 Cálculo do Número de Residências Atendidas - Real..... | 61 |
| 5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 63 |
| REFERÊNCIAS..... | 65 |
| APÊNDICE 1 - Quadro da quantidade de resíduos sólidos dispostos mensalmente no aterro sanitário do Cirsures por cada município integrante do Consórcio a partir do período de 2007..... | 69 |
| Anexo 1 – Metodologia utilizada para a caracterização físico-química do gás produzido no aterro sanitário..... | 74 |

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional desordenado no Brasil nas últimas décadas, juntamente com a expansão industrial e o aumento do consumismo, a geração de resíduos sólidos passou a aumentar de forma descontrolada. Os resíduos sólidos podem acarretar sérios danos ao meio ambiente, a economia e ao bem estar da população de acordo com suas características, sendo elas classificadas em nosso país pela ABNT como Classe I – Perigosos, Classe IIA – Não Perigosos Não Inertes e Classe IIB – Não Perigosos Inertes (ABNT – 2004).

O aumento da geração dos resíduos sólidos levou a população a desenvolver formas de disposição final para os mesmos, porém, algumas dessas alternativas acabam acarretando como consequência outros impactos ambientais na água, ar e solo, como por exemplo a disposição final em lixões e a incineração. Dentre as alternativas de disposição sugeridas, o aterro sanitário é uma das que melhor se adequa às necessidades da sociedade atual, devido ao seu processo de disposição final dos resíduos sólidos e por conter sistemas de tratamento de efluentes líquidos e gasosos gerados no processo de decomposição dos resíduos.

Uma das problemáticas encontradas não apenas em aterros sanitários, mas também em outras formas de disposição de resíduos sólidos é a emissão do biogás. O biogás é composto por diversos gases e entre eles pode ser destacados o CO₂ e o metano. O gás metano é gerado através de processos bioquímicos de decomposição dos resíduos e segundo estudos, é considerado um gás com um potencial de efeito estufa 20 vezes maior do que o gás carbônico.

A partir dessa problemática, foram desenvolvidas técnicas e métodos a fim de tratar a emissão do gás metano, reduzindo o seu grau de emissão para a atmosfera ou reaproveitá-lo para um fim mais nobre, ou seja, coletar o gás metano através de drenos e transformá-lo em energia.

O aterro sanitário do Cirsures está localizado no bairro Rio Carvão, município de Urussanga e teve início de suas operações em março de 2004 a partir da aprovação do Projeto Executivo pelo Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA). Visto a necessidade de resolver o problema de disposição final dos resíduos sólidos na região. A partir dessa necessidade de adequar-se à gestão

correta dos resíduos sólidos, seis municípios da região sul do Estado de Santa Catarina, Cocal do Sul, Lauro Müller, Morro da Fumaça, Orleans, Treviso e Urussanga, instituíram o Consórcio Intermunicipal de Resíduos Sólidos Urbanos da Região Sul (Cirsures), sendo que o município de Siderópolis aderiu-se em 2014, formando até então sete municípios integrantes do Consórcio.

Anualmente o aterro sanitário trata mais de 10.000 toneladas de resíduos sólidos e conta com uma estação de tratamento, onde são tratados mais de 7.000 m³ de chorume por ano, minimizando os impactos ambientais na Micro Bacia do Rio dos Americanos, localizado na Bacia do Rio Urussanga. Atualmente, o aterro sanitário apresenta sistema de captação do biogás, contudo o mesmo não é aproveitado para fins energéticos e é queimado de forma contínua ou intermitente e emitido para atmosfera e assim justifica-se o estudo deste trabalho de conclusão de curso.

A partir da questão citada acima, o trabalho buscou realizar um estudo de viabilidade para o aproveitamento energético do gás de aterro, de acordo com a metodologia estabelecida para a realização do levantamento da capacidade energética de gás metano produzido no aterro sanitário. As metas estabelecidas no trabalho visam realizar um diagnóstico da quantidade de resíduos que chegam ao aterro sanitário, realizar o balanço de massa dos resíduos gerados e balanço de energia dos gases emitidos, determinar a capacidade energética do gás metano produzido no aterro sanitário, quantificar o potencial de energia em kWh que será produzida e avaliar o número de residências a serem atendidas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

Os resíduos sólidos são considerados materiais heterogêneos, ou seja, sua composição pode ser definida como um material inerte, ou de origem orgânica, ou de origem mineral. Esses materiais são gerados a partir de atividades antrópicas ou pela própria natureza, e podem ser utilizados de forma parcial, a fim de assegurar a saúde pública e a economia dos recursos naturais. Dentre os problemas constituintes dos resíduos sólidos, encontram-se os problemas sanitários, econômicos e principalmente estéticos (LIMA, 2001).

Ao reforçar a concepção sobre resíduos sólidos, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define resíduos sólidos como:

Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT, 2001, p. 01).

Quanto à classificação dos resíduos, pode-se afirmar que eles são caracterizados quanto a sua origem, ou seja, são separados em domiciliar, comercial, público, serviços de saúde, hospitalar, portos, aeroportos, terminais rodoviários, terminais ferroviários, industriais, agrícolas e entulhos (D'ALMEIDA e VILHENA, 2000).

A Lei 12.305/2010 que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos art. 13 classifica os resíduos quanto a sua origem da seguinte forma:

- Resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- Resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- Resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas "a" e "b";
- Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas "b", "e", "g", "h" e "j";
- Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea "c";
- Resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;

- Resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do SISNAMA e do SNVS;
- Resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- Resíduos agrosilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- Resíduos dos serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteiras;
- Resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios (BRASIL, 2010).

Outra forma de classificar os resíduos além da origem, é classificá-los quanto a periculosidade. Dessa forma, os resíduos são divididos em três categorias (ABNT/NBR, 2004).

- Resíduos classe I – Perigosos: Aqueles que apresentam periculosidade que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, pode apresentar risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices e riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada. Esses resíduos apresentam propriedades como: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- Resíduos classe II A - Não inertes: Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B - Inertes, nos termos desta Norma. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
- Resíduos classe II B – Inertes: Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor (ABNT, 2004, p. 3-5).

2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL

Em todo mundo e também no Brasil, o crescimento das cidades acaba reduzindo a ocupação nas áreas rurais, e quase sempre a população tem seu crescimento superior ao desenvolvimento da infraestrutura. Essa situação pode ser descrita na limpeza urbana, ou seja, analisar que alguns problemas típicos nas cidades brasileiras são as ruas sujas e depósitos clandestinos de lixo transformam e focos de dengue e outras doenças. Embora dispersas em todas

as cidades, geralmente esses problemas estão concentrados em áreas mais pobres, onde a coleta de lixo é menos eficiente, causando assim, riscos à saúde pública da população nesses locais (ABREU, 2001).

Num levantamento realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) nos anos de 2000 e 2008 foi analisado o crescimento da produção de resíduos sólidos no Brasil. Esse crescimento se dá principalmente pelo aumento da população no país e conseqüente aumento no consumismo. Na Tabela 1 é apresentado o comparativo do crescimento de produção de resíduos sólidos no Brasil nos anos de 2000 e 2008.

Tabela 1 – Estimativa da quantidade de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos coletados no Brasil nos períodos de 2000 e 2008. (1)

| Unidade de Análise | Quantidade de Resíduos Coletados (t/dia) | |
|--------------------|--|------------|
| | 2000 | 2008 |
| Brasil | 149.094,30 | 183.481,50 |
| Norte | 10.991,40 | 14.637,30 |
| Nordeste | 37.507,40 | 47.203,80 |
| Sudeste | 74.094,00 | 68.179,10 |
| Sul | 18.006,20 | 37.342,10 |
| Centro-Oeste | 8.495,30 | 16.119,20 |

Fonte: MMA (2011), elaborado a partir de Datasus (2011) e IBGE (2002, 2010a) e modificado pelo autor.

1 As informações sobre a quantidade coletada apresentaram relevante inconsistência, o que dificultou consideravelmente as análises. Conforme apresentado na Tabela 1, os dados indicam um aumento da quantidade, em termos absolutos e relativos, em todas as regiões, com exceção da Região Sudeste. Essa inconsistência sugere que pode haver falhas na metodologia utilizada para a coleta dos dados.

De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) (2011, p. 11), à coleta seletiva, entre 2000 e 2008 houve um aumento de 120% no número de municípios que desenvolvem tais programas, que chegaram a 994, estando a maioria localizada nas regiões Sul e Sudeste. Em algumas regiões, a análise de dados acabou sendo dificultada devido a inconsistência de dados, como por exemplo na região Sudeste (MMA, 2011).

Segundo Arruda (2009, p. 37), no Brasil, o resíduo sólido não tem recebido a atenção merecida do Poder Público, da coletividade e dos indivíduos em geral. O principal motivo se reflete no resultado que é causado pelos poluentes gerados dos resíduos líquidos e gasosos, onde sua dispersão é de

maior facilidade e de forma mais rápida comparada aos resíduos sólidos, tendo como resultado o despertar de forma mais ágil, a atenção da população e das autoridades públicas (ARRUDA, 2009).

Os resíduos sólidos deverão ser tratados de forma a minimizar os riscos à saúde pública e após o processo, serem liberados no meio ambiente, em locais específicos (ARRUDA, 2009).

Na Tabela 2 é apresentada a destinação final dos resíduos sólidos no Brasil nos anos de 2000 e 2008.

Tabela 2 - Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos encaminhados para diferentes formas de destinação final no Brasil nos períodos de 2000 e 2008.

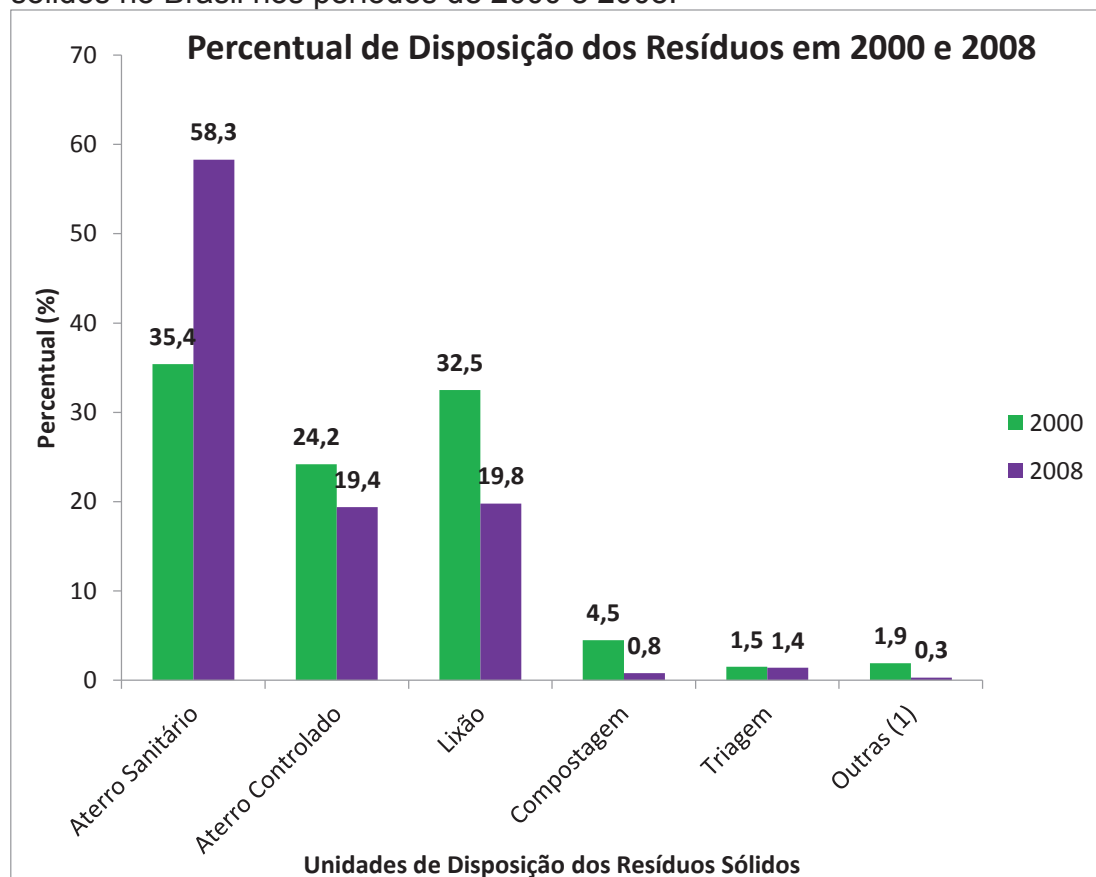
| Destino Final | Quantidade (t/dia) | |
|------------------------|--------------------|------------|
| | 2000 | 2008 |
| Total | 140.080,70 | 188.814,90 |
| Aterro Sanitário | 49.614,50 | 110.044,40 |
| Aterro Controlado | 33.854,30 | 36.673,20 |
| Lixão | 45.484,70 | 37.360,80 |
| Unidade de Compostagem | 6.364,50 | 1.519,50 |
| Unidade de Triagem | 2.158,10 | 2.592,00 |
| Outras Unidades (1) | 2.603,60 | 625,00 |

Fonte: MMA (2011), elaborado a partir de IBGE (2002), IBGE (2010b) e modificado pelo autor.
1 Outras Unidades incluem incineração, locais não fixos e vazadouros em áreas alagáveis.

Ao passar dos anos, a destinação final dos resíduos sólidos para os aterros sanitários passou a ser mais utilizado, pois o aterro sanitário é considerado a forma mais segura para dispor-se adequadamente dos resíduos sólidos. De acordo com Gonçalves (2003, p. 29), no Brasil, em função da crescente consciência da necessidade da reciclagem, um número cada vez maior de municípios vem desenvolvendo ações para a implantação da coleta seletiva.

Na Figura 1 é apresentado um comparativo percentual de disposição dos resíduos sólidos nos anos de 2000 e 2008.

Figura 1 - Gráfico da relação em percentual da disposição final dos resíduos sólidos no Brasil nos períodos de 2000 e 2008.



Fonte: MMA (2011), elaborado a partir de IBGE (2002), IBGE (2010b) e modificado pelo autor. 1 Outras Unidades incluem incineração, locais não fixos e vazadouros em áreas alagáveis.

Dentre as unidades de disposição mencionadas no gráfico, o aterro sanitário é a alternativa mais viável para a disposição adequada dos resíduos sólidos atualmente. De acordo com Arruda (2004, p. 45), os aterros sanitários são locais escolhidos pelo Poder Público para o depósito de resíduos sólidos, os quais possuem respiros e drenos para a liberação dos gases.

O tempo de decomposição dos materiais que entram no aterro sanitário variam de meses a milhares de anos. Na Tabela 3 é apresentada o tempo médio de decomposição desses resíduos encontrados no aterro sanitário.

Tabela 3 - Tempo de decomposição dos resíduos nos aterros sanitários.

| Tipo de Resíduo | Tempo de Decomposição | Tipo de Resíduo | Tempo de Decomposição |
|------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Cascas de frutas | 1 a 3 meses | Lata de conserva | 100 anos |
| Papel | 3 a 6 meses | Latas de alumínio | 200 anos |
| Pano | 6 meses a 1 ano | Plástico | 450 anos |
| Chiclete | 5 anos | Fralda descartável | 600 anos |
| Filtro de cigarro | 5 a 10 anos | Garrafas de vidro | Indeterminado |
| Tampa de garrafa | 15 anos | Pneu | Indeterminado |
| Madeira pintada | 15 anos | Garrafas pet | Indeterminado |
| Nylon | Mais de 30 anos | Borracha | Indeterminado |
| Sacos plásticos | 30 a 40 anos | Vidro | 1 milhão de anos |

Fonte: Ferreira et al. (2011), modificado pelo autor.

2.2.1 Composição Dos Resíduos Sólidos

Os resíduos sólidos gerados são compostos de acordo com as diversas atividades antrópicas, e com o passar dos tempos tem se diversificado cada vez mais de acordo com o momento em que a raça humana vem evoluindo-se tecnologicamente, utilizando os mais variados materiais em seus hábitos de consumo (ABLP, 2000).

Os resíduos apresentam uma grande diversidade na sua composição e são gerados a partir das mais variadas atividades humanas nos ambientes urbanos. De acordo com Naime (2005 apud IPAT, 2013, p. 27), pode-se citar como resíduos sólidos os restos de alimentos, plásticos, metais, papel e papelão, materiais resultantes de atividades de limpeza doméstica e pública, como restos de poda, folhas, galhos de árvores e restos de varrição.

Na Tabela 4 é apresentada a quantidade de resíduos sólidos com suas respectivas características que foram coletados no Brasil no ano de 2008.

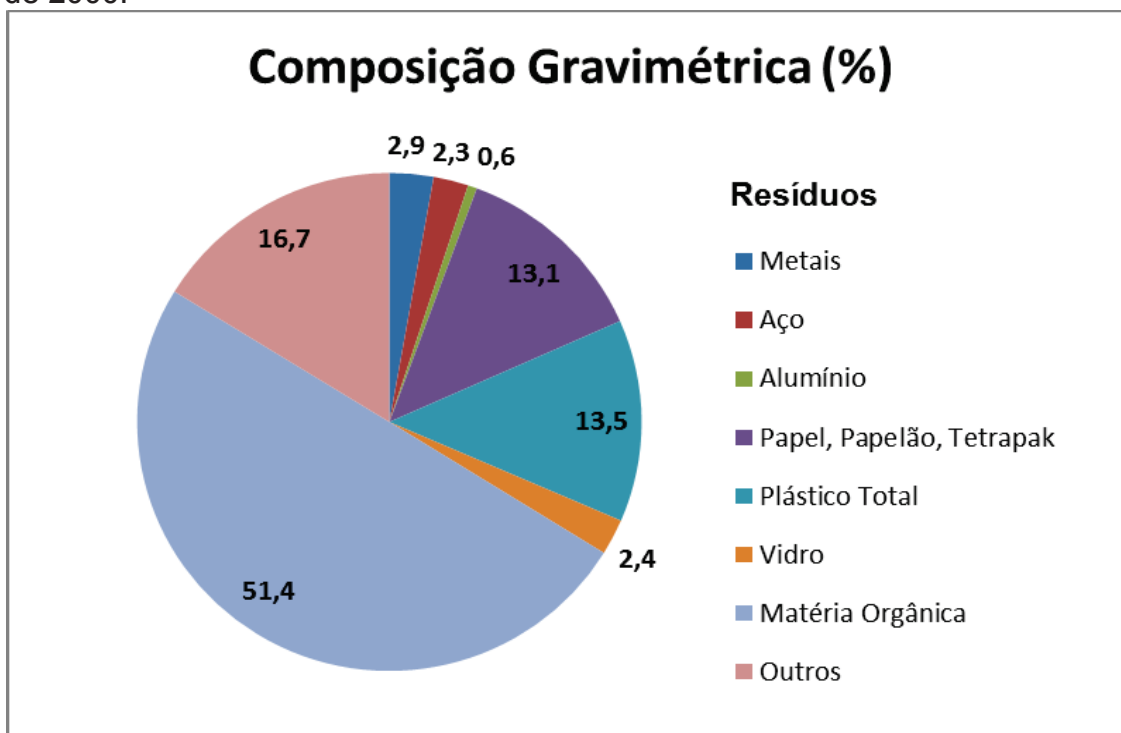
Tabela 4 - Quantidade característica de resíduos sólidos coletados no Brasil no período de 2008.

| Resíduos | Quantidade (ton/dia) |
|--------------------------|----------------------|
| Total | 183.481,50 |
| Metais | 5.293,50 |
| Aço | 4.213,70 |
| Alumínio | 1.079,90 |
| Papel, Papelão, Tetrapak | 23.997,40 |
| Plástico Total | 24.847,90 |
| Vidro | 4.388,60 |
| Matéria Orgânica | 94.335,10 |
| Outros | 30.618,90 |

Fonte: MMA (2011), elaborado a partir de IBGE (2010b) e modificado pelo autor.

A matéria orgânica tem um grande destaque na composição dos resíduos sólidos no Brasil atualmente. Na Figura 2 é apresentado a percentagem da composição gravimétrica dos resíduos sólidos.

Figura 2 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos no Brasil na década de 2000.



Fonte: MMA (2011) p. 09.

2.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO GÁS METANO

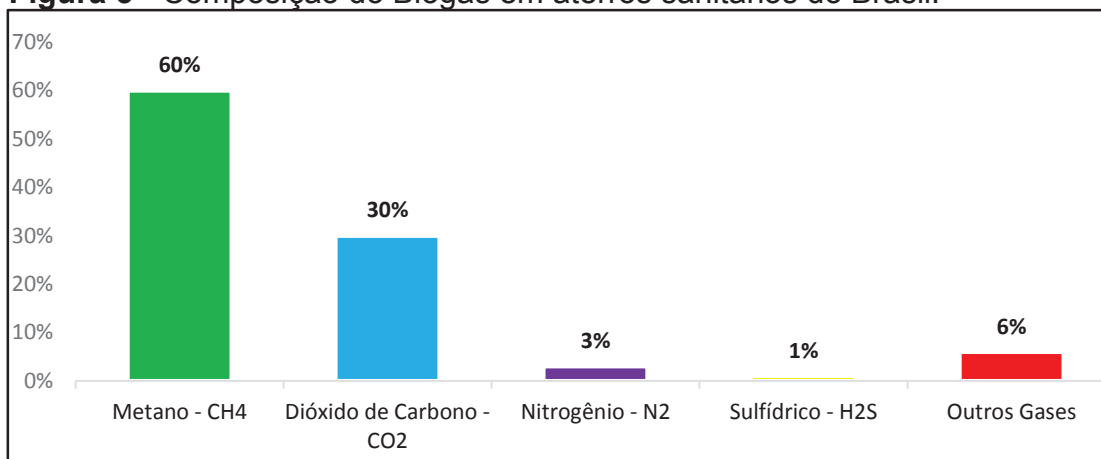
O biogás gerado em aterros é composto de grandes quantidades dos mais variados gases principais e de gases que estão presentes em quantidades pequenas, tais como oligogases. Os gases principais são gerados a partir da decomposição dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), já alguns oligogases podem ser encontrados em quantidades pequenas, e dependendo da composição e apresentam riscos à saúde pública de acordo com sua toxicidade (BRITO FILHO, 2005).

Conforme mencionado no manual de produtos perigosos da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), o gás metano é considerado um gás comprimido liquefeito, que não possui coloração mas tem odor suave. Flutua e ferve na água e produz nuvem de vapor que é visível e considerada inflamável.

De acordo com Brito Filho (2005, p. 52), o metano e o dióxido de carbono são os principais gases procedentes da decomposição anaeróbia dos componentes biodegradáveis dos resíduos orgânicos nos RSU. Dentre os gases constituintes do gás de aterro, podem ser encontrados a amônia (NH_3), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), metano (CH_4), nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2) (BRITO FILHO, 2005).

Na Figura 3 é apresentado a composição média percentual do Biogás gerado em aterros sanitários.

Figura 3 - Composição do Biogás em aterros sanitários do Brasil.



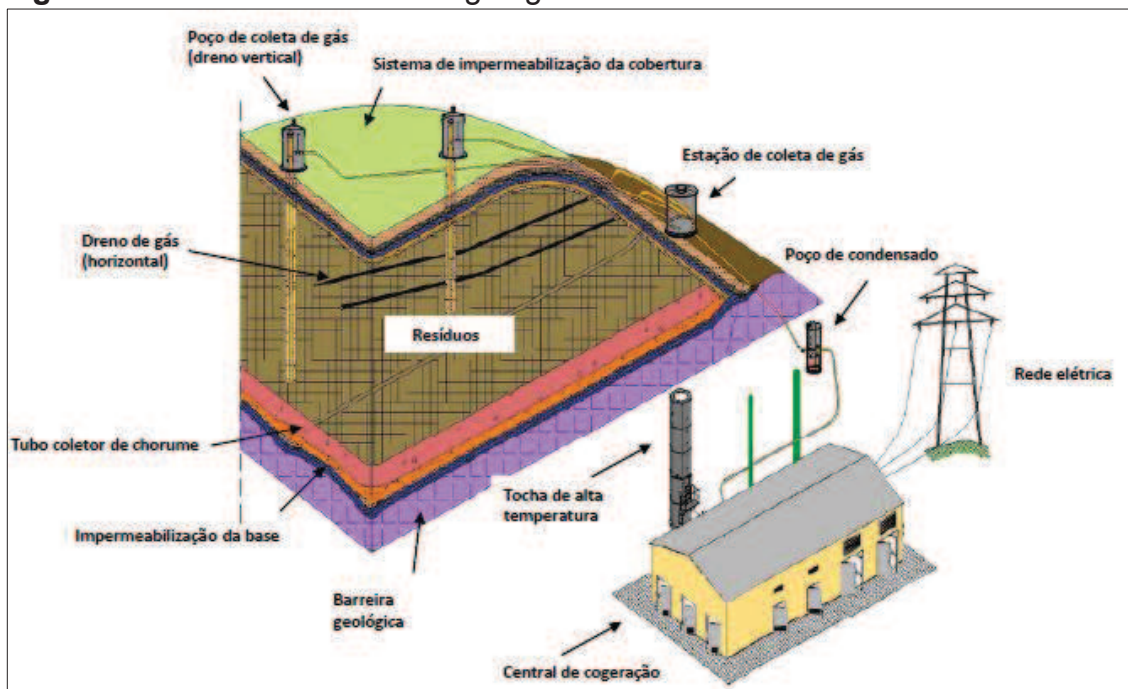
Fonte: Ultrapuro (2009), apud Rodrigues (2010) p. 24.

Conforme apresentado num workshop realizado na Alemanha em 2013, Ostenberg menciona que o gás metano de aterros sanitários é formado através de cinco processos bioquímicos de decomposição, entre eles são:

- Fase aeróbica: geração de água (H_2O), nitrogênio (N_2) e dióxido de carbono (CO_2) com consumo do oxigênio contido no ar (O_2);
- Fase anaeróbica acidogênica: geração de nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2) e dióxido de carbono (CO_2) por bactérias em ambientes quase anaeróbico (oxigênio existente vai se esgotando);
- Fase anaeróbica metanogênica instável: ativação de microorganismos metanogênicos;
- Fase anaeróbica metanogênica estável: em meio anaeróbico, a matéria orgânica é transformada em metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O). Nesta fase, são geradas quantidades e qualidades aproveitáveis de gás de aterro sanitário;
- Fase de atividade metanogênica decrescente: fase caracterizada por quantidades decrescentes de gás de aterro e transição de degasificação ativa para degasificação passiva (OSTNBERG, 2013).

Na Figura 4 é apresentado o sistema de captação do gás de aterro elaborado pela Umwelt Gesellschaft Mit Beschränkter Haftung “Companhia de Responsabilidade Limitada do Meio Ambiente” (GmbH) em 2013.

Figura 4 - Sistema de coleta de gás gerado em aterros sanitários.



Fonte: Ostenberg (2013).

A composição química do biogás gerado em aterros sanitários vai depender de fatores como o tipo de resíduo que será depositado, ou seja, do teor e distribuição da matéria orgânica disposta. As condições construtivas do aterro, como a espessuras das camadas e a compactação e a idade do setor do aterro são outros fatores importantes que devem ser levados em conta na composição química do biogás (OSTENBERG, 2013).

O biogás é um composto rico em metano, semelhante ao gás natural e que é produzido através da digestão anaeróbica da biomassa ou através da conversão termoquímica de biomassa para um gás rico em metano denominado gás natural bio-sintético (bio-SNG). As suas propriedades são aproximadamente iguais ao do gás natural, podendo ser também injetado na rede de gás natural e utilizados em usinas de gás nos setores comerciais, ou em edifícios e setores de transporte (IEA, 2012).

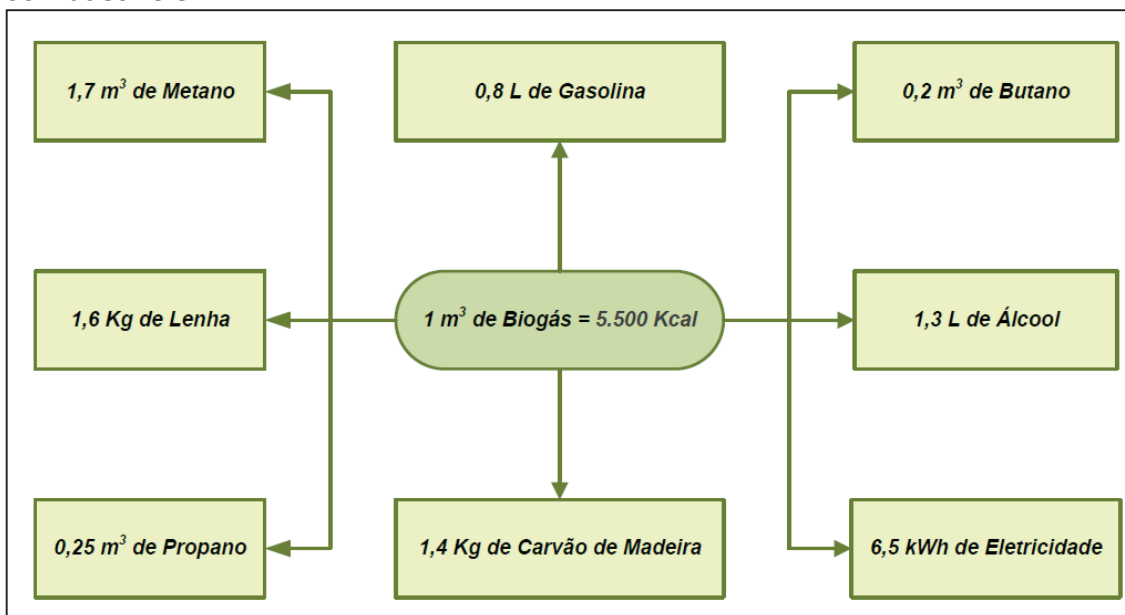
Sobre as utilidades do biogás, Rodrigues menciona que:

O biogás pode ser usado como combustível em substituição ao gás natural (GNV) ou ao gás liquefeito de petróleo (GLP), ambos extraídos de reservas minerais. O biogás pode ser utilizado para cozinhar em residências rurais próximas ao local de produção (economizando outras fontes de energia, como principalmente lenha ou GLP). Pode também ser utilizado na produção rural como, por exemplo, no aquecimento de instalações para animais muito sensíveis ao frio (aves e suínos com poucos dias de vida, por exemplo) ou no aquecimento de

estufas de produção vegetal. Além disso, pode ser usado na geração de energia elétrica, através de geradores elétricos acoplados a motores de explosão ou turbinas adaptadas ao consumo de gás. (RODRIGUES, 2010, p. 23).

Na Figura 5 é apresentada a equivalência energética do biogás, comparado com os outros combustíveis.

Figura 5 - Equivalência energética do Biogás comparado a outros tipos de combustíveis.



Fonte: Fernandes (2012).

2.3.1 Cálculos da Geração de Gás Metano

Diversos métodos são utilizados para estimarem as emissões de metano a partir da disposição de resíduos sólidos. Esses métodos podem variar não apenas nas hipóteses apresentadas, mas sim na sua complexidade e na quantidade de dados necessários (IPCC, 1996).

Os cálculos da geração de gás metano são elaborados a partir de uma metodologia padrão de balanço de massa que envolve a estimativa da quantidade de Carbono Orgânico Degradável (DOC) dos resíduos sólidos, ou seja, o carbono orgânico que é gerado através da decomposição química. E a partir desta estimativa, pode-se calcular a quantidade de metano que podem ser gerados pelo lixo (IPCC, 1996). De acordo com Alves e Vieira (1998, p. 01), é

necessário conhecer o total da população urbana, além das condições de tratamento dos efluentes e de disposição de resíduos.

Numa abordagem mais ampla sobre a metodologia proposta pelo Intergovernmental Panel on Climate Change “Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas” (IPCC), Alves e Vieira mencionam que:

O IPCC sugere ainda que na medida do possível sejam tomadas da literatura nacional informações técnicas locais como a geração específica de carga orgânica dos efluentes industriais em função de unidades de produtos, a eficiência de remoção de matéria orgânica de cada sistema empregado, as características de degradação dos aterros e de sistemas de tratamento de efluentes industriais, a geração potencial de biogás e as quantidades recuperadas. (ALVES E VIEIRA, 1998, p. 01).

A metodologia elaborada pelo IPCC em 1996, pode ser destacada em três aspectos importantes:

- Ao invés de distinguir entre aterros e lixões, a metodologia usa uma série de locais para a disposição de resíduos sólidos, conforme o grau de gestão dos resíduos e profundidade;
- Os valores padrões de DOC são fornecidos através dos fluxos de resíduos para que os países possam calcular a quantidade de DOC dos seus resíduos sólidos em vez de dependerem de valores padrão único;
- Enfatiza o fato de que a metodologia estima a geração de metano ao invés da emissão, e que a oxidação ocorre frequentemente nas camadas superiores da massa de resíduos e em material de cobertura.

2.3.2 Trabalhos Desenvolvidos com o Gás Metano

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2013, p. 87), em novembro de 2008 existiam três usinas termelétricas de pequeno porte movida a biogás em operação no Brasil. A primeira usina foi inaugurada em 2003, dentro do aterro sanitário Bandeirantes, na cidade de São Paulo, com capacidade instalada de 20 MW. Na época, foi considerada como a maior usina de biogás do mundo (ANEEL, 2013).

Outras usinas instaladas encontram-se em São João, também localizada em aterro sanitário da cidade de São Paulo, com potência instalada

de 24,6 MW. E a Energ Biogr., com 30 kW de potência, na cidade de Barueri, região da Grande São Paulo. Além dessas usinas instaladas, haviam outros sete empreendimentos outorgados, dando um total de 109 MW de potência nos Estados de São Paulo, Bahia, Rio de Janeiro, Pernambuco e Santa Catarina (ANEEL, 2013).

Outros projetos-pilotos referentes ao biogás foram utilizados no Estado do Paraná, dentre esses projetos, encontram-se a compra da energia excedente produzida em pequenas propriedades rurais a partir de dejetos de animais. Esse projeto foi denominado como Programa de Geração Distribuída com Saneamento Ambiental, onde permitirá a utilização do material orgânico decorrente da criação de suínos, evitando o seu lançamento em rios e em reservatórios como, por exemplo, o da usina hidrelétrica de Itaipu (ANEEL, 2013).

Conforme a ANEEL (2013, p. 87), os resíduos serão transformados, por meio de biodigestores, em biogás, combustível usado na produção de energia elétrica. Por decisão da ANEEL, a potência a ser instalada nesses empreendimentos inclusos no programa será de 300 kVA, que equivale a 270 kW, abastecendo 60 unidades residenciais com um consumo mensal médio de 150 kW (ANEEL, 2013).

2.4 CRÉDITOS DE CARBONO

Com a assinatura do Protocolo de Kyoto, pode-se concluir de que o mercado poderia auxiliar na redução dos gases de efeito estufa de acordo com o plano de criar-se um valor transacionável para essas reduções, conforme alguns mecanismos presentes em países emissores de gases na Europa e Estados Unidos (OLIVEIRA, 2010).

De acordo com Oliveira (2010, p. 18), dentro desse princípio foram estabelecidos mecanismos de flexibilização, entre eles o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), previsto no Artigo 12 do Protocolo de Kyoto. O MDL, estabelece a participação de países em desenvolvimento, onde está inserido o Brasil. Já os outros dois mecanismos têm atuação em países desenvolvidos ou industrializados, que são a Implementação Conjunta e o Comércio de Emissões (GOMES E GARCIA, 2013).

O MDL pode ser considerado como uma forma mais viável de mercado para o Brasil. Numa abordagem a respeito dos projetos propostos pelo MDL, Poppe e La Rovere citam que:

Os principais projetos que podem ser certificados como redutores da emissão de carbono no seio do MDL são: projetos de aterros sanitários e esgotamento sanitário, projetos de eficiência energética, de substituição de combustíveis e de energias renováveis, projetos de melhoria de processos produtivos e projetos no uso do solo e florestas. (POPPE E LA ROVERE, 2005, p. 60).

Segundo Gomes e Garcia (2013, p. 213), o mercado de carbono mundial é dividido em voluntário e regulado pelo Protocolo de Kyoto. No primeiro caso, os países e empresas não empregam o objetivo de reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), já o segundo caso, o regulado, os países e empresas inseridos devem reduzir os níveis de poluição, caso contrário, o descumprimento deste compromisso, conseqüentemente implicará em multas conforme instituído no Protocolo de Kyoto (GOMES E GARCIA, 2013).

O país que oferecer-se a fazer parte do mercado de carbono, poderá ter benefícios como a obtenção de recursos a partir do reflorestamento e investindo na recuperação das suas áreas degradadas. O financiamento para o sequestro de carbono que vem se desenvolvendo conforme a importância dada pela mídia ambiental e do marketing verde, ainda é considerado incerto, pelo fato de não ter sido ratificado internacionalmente, porém, o mercado vem se desenvolvendo apesar da não aprovação do protocolo (OLIVEIRA, 2010).

2.5 INCENTIVOS GOVERNAMENTAIS

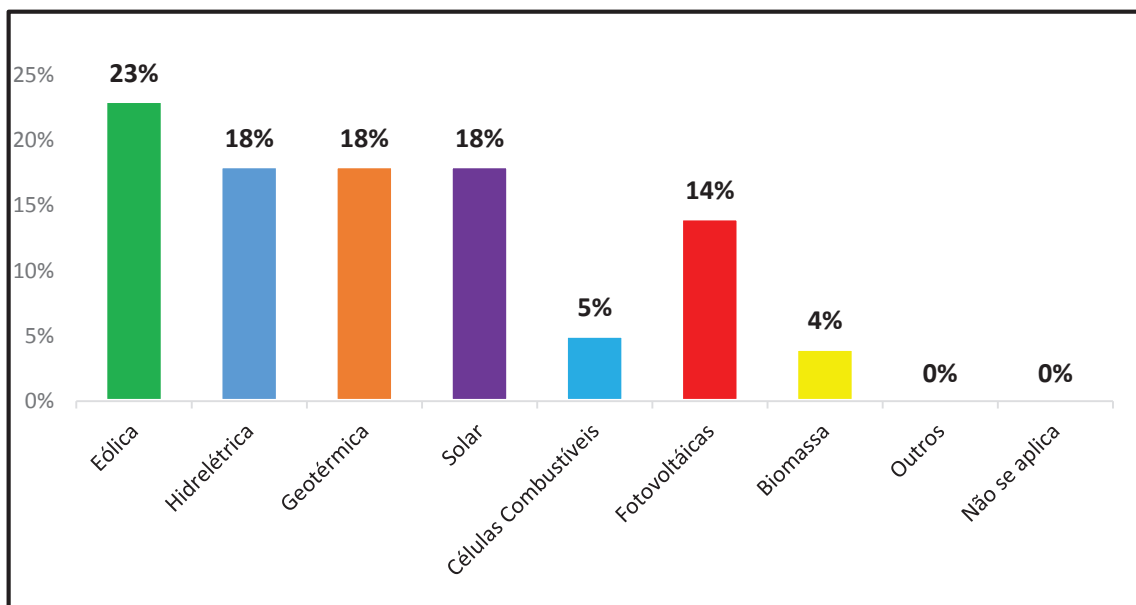
De acordo com o Rodrigues (2010, p. 23), a produção de energia elétrica a partir da biomassa, atualmente, é muito defendida como uma alternativa importante para países em desenvolvimento e também outros países. A ação da política pode ser feita através do fornecimento de incentivos para a produção de bioenergia a partir de resíduos desperdiçados, uso de matérias-primas altamente produtivas, e utilização mais eficiente de coprodutos, tais como o calor desperdiçado (IEA, 2012).

Que incentivo a política específica, ou a combinação de medidas de apoio é o mais adequado para promover a sustentabilidade a partir da

bioenergia, isso vai depender de uma série de fatores que geralmente são específicas para cada país. Essa é a realidade da bioenergia, tanto que a biomassa é considerada um recurso não distribuído igualmente entre diferentes regiões. A importância das fontes renováveis que estão inseridas no mercado de energia estão relacionadas com a solidificação do setor e a relação custo-competitividade da geração de bioenergia, comparado com os combustíveis fósseis (IEA, 2012).

Um dos maiores programas de incentivo as fontes de energias renováveis do Brasil, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), instituído pela Lei 10.438/2002, é administrado pela Eletrobrás. A partir deste programa, tem-se pesquisado soluções de porte regional para o uso das fontes de energias renováveis e juntamente com isso, o incentivo ao desenvolvimento da indústria nacional (GUERRA e YOUSSEF, 2011). Na Figura 6 é apresentado o percentual dos setores energéticos alternativos vigentes no ano de 2010.

Figura 6 - Percentual dos setores energéticos vigentes no Brasil no ano de 2010.



Fonte: Guerra e Youssef, (2010) p. 132.

2.6 NECESSIDADE DESSAS NOVAS TECNOLOGIAS

No contexto que vivenciamos atualmente, a preocupação com a segurança energética e mudanças climáticas, levam a crer de que é essencial o incentivo a implantação de fontes de energias renováveis. A partir do menor uso de recursos naturais como fontes renováveis, elas são capazes de promover maior segurança energética aos países que se aproveitam disso, e o seu aproveitamento em grandes quantidades é considerado como um dos principais fatores de combate às mudanças climáticas decorrentes do aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera (UCZAI, 2012).

Segundo Guerra e Youssef (2011, p. 68), As fontes de energia renovável tenderão, nos próximos anos, a assumir uma participação relevante na matriz energética global, à medida que cresce a preocupação da sociedade com as questões ambientais.

Com o desenvolvimento crescente das fontes renováveis, limpas e alternativas de energia, foi necessário o aperfeiçoamento de profissionais e a formação de competências para motivar o crescimento econômico e o desenvolvimento tecnológico nesse setor. Dessa forma, as energias renováveis, que representam um avanço na tecnologia atual, precisam da cooperação das Instituições de Ensino Superior (IES) no âmbito, da pesquisa e da formação de profissionais. Mesmo que seja necessário trabalhar com esse tema, as universidades europeias e latino-americanas não abordam tanto esse tema em seus currículos (GUERRA e YOUSSEF, 2011).

Ao mencionar sobre os benefícios das energias renováveis, Uczai afirma que:

[...] além de prover esses benefícios, as fontes de energia renováveis, se implantadas apropriadamente, podem também contribuir para o desenvolvimento social e econômico, para a universalização do acesso à energia e para a redução de efeitos nocivos ao meio ambiente e à saúde. (UCZAI, 2014, apud IPCC, 2011, p. 23).

O uso das fontes renováveis podem acabar contribuindo para o desenvolvimento social e econômico, além de levar ao acesso à energia, segurança energética, mitigação das mudanças climáticas e redução de problemas ambientais e riscos à saúde, causados pela poluição do ar, levando assim, a todas as dimensões do desenvolvimento sustentável (UCZAI, 2012).

3 METODOLOGIA

3.1 QUANTIDADE DE RESÍDUOS QUE CHEGAM AO ATERRO SANITÁRIO

Nessa etapa foi realizado um levantamento da quantidade de resíduos sólidos que foram depositados no aterro sanitário do Cirsures. Esse diagnóstico foi embasado nos dados realizados a partir da pesagem dos caminhões que chegam diariamente ao aterro sanitário. Os valores finais foram concentrados em um resultado total de toneladas por ano a partir do período de 2007.

3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO GÁS PRODUZIDO NO ATERRO SANITÁRIO

Em anexo está a metodologia que iria ser utilizada e que por problemas no equipamento do IPAT não foi possível realizar no tempo de realização deste trabalho. Assim, optou-se por utilizar o disposto na metodologia pelo “Conselho Internacional para Iniciativas Ambientais Locais” (ICLEI) (2009, p. 64), onde ficou estabelecido que a produção de metano é cerca de 50% do total do biogás produzido.

3.3 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA DOS RESÍDUOS GERADOS

A partir do levantamento da quantidade de resíduos sólidos dispostos no aterro sanitário e da análise das características físico-químicas do biogás emitido, foi realizado um balanço de massa e energia desses gases e resíduos, a fim de avaliar o potencial energético do gás metano e a composição sólida e gasosa dos resíduos sólidos.

Esse balanço de massa contém os dados referentes ao percentual de matéria orgânica, plásticos, tecidos e madeira presentes nos resíduos sólidos que são dispostos no aterro sanitário, responsáveis pela emissão do biogás através da decomposição desses materiais.

Já o balanço de energia foi realizado com o intuito de avaliar o potencial energético do aterro sanitário, para avaliar o potencial energético do

gás metano presente no biogás para utilizá-lo em algum segmento de atividades futuras, tais como abastecimento de veículos ou até mesmo do próprio aterro sanitário.

3.4 CAPACIDADE ENERGÉTICA DO GÁS METANO PRODUZIDO NO ATERRO SANITÁRIO

A partir da análise da composição gravimétrica para os resíduos de matéria orgânica, plásticos, tecidos e madeira, estimou-se a quantidade de gás metano que é produzido no aterro sanitário, para isso, foi utilizada a equação elaborada pelo IPCC, a fim de estimar a quantidade de gás metano a ser gerado pelo período de tempo considerado.

Para calcular o potencial de geração em aterros, foram utilizadas as metodologias propostas pelo IPCC, presentes no Módulo 6 – Lixo, do Guia para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, Volume 2: Livro de Trabalho, de 1996 e Módulo 5 – Resíduos, Volume 2: Geração de Resíduos, Composição e Gestão de Dados, e Volume 3: Disposição de Resíduos Sólidos, de 2006 (COELHO, ALENCAR e OLIVEIRA, 2010).

Para encontrar quantidade de metano emitido, utiliza-se a Equação 1:

$$Q_{CH_4} = k * R_x * L_0 * e^{-k * (x - T)} \quad (1)$$

Onde:

Q_{CH_4} – Vazão de metano ($m^3 CH_4$ /ano);

k – Constante de decaimento (esse valor é obtido na Tabela 3.3 do Módulo 5 – Resíduos, do Guia do IPCC, Volume 3: Disposição de Resíduos Sólidos, de 2006, para clima tropical – resíduos úmidos);

R_x – Fluxo de resíduos do ano (ton RSD);

L_0 – Potencial de geração de metano (m^3 biogás/ton RSD);

x – Ano atual;

T – Ano de deposição do resíduo no aterro (início da operação).

Antes de poder encontrar a emissão de metano no aterro, é necessário primeiramente calcular a fração de carbono orgânico degradável do resíduo (COD) que é depositado no aterro. Para isso, utiliza-se a Equação 2:

$$\text{COD} = \sum (\text{COD}_i * W_i) \quad (2)$$

Onde:

COD – Fração de carbono orgânico degradável nos resíduos;

COD_i – Fração de carbono orgânico degradável no tipo de resíduo i;

W_i – Fração do tipo de resíduo conforme a categoria do resíduo.

O valor do COD foi obtido através da composição do material que é depositado no aterro sanitário, conforme mencionado na Tabela 2.5 do Módulo 5 – Resíduos, do Guia do IPCC, Volume 2: Geração de Resíduos, de 2006, e citado na Tabela 5.

O COD_i está relacionado com a composição do material depositado no aterro sanitário, mencionado na Tabela 5 de acordo com o guia do IPCC. O W_i será de acordo com a análise da composição gravimétrica realizada nos resíduos em porcentagem de componentes presentes nos mesmos, ou seja, matéria orgânica, papel/papelão, madeira, entre outros.

Tabela 5 - Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do lixo segundo IPCC, 2006.

| Componente | Porcentagem COD (Em Massa) |
|----------------------------------|----------------------------|
| A) Papel/papelão | 40 |
| B) Resto de alimentos | 15 |
| C) Resíduos de parques e jardins | 17 |
| D) Tecidos | 40 |
| E) Madeiras | 30 |

Fonte: IPCC (2006).

Após encontrar o valor para o COD, o mesmo é utilizado para encontrar o potencial de geração de metano no resíduo (L₀), aplicado na Equação 3:

$$L_0 = FMC * COD * COD_f * F * \frac{16}{12} \quad (3)$$

Onde:

L_0 – Potencial de geração de metano do resíduo (m^3 biogás/tonRSD);

FMC – Fator de correção do metano conforme Tabela 06;

COD – Fração de carbono orgânico degradável no lixo encontrado na Equação 2;

F – Fração de metano presente no biogás. Caso o aterro não possua o valor real da quantidade de metano presente no biogás, pode-se utilizar a estimativa de 0,5, pois geralmente a quantidade de metano presente no biogás de aterro é 50%;

$\frac{16}{12}$ – Conversão de carbono para metano (CH_4);

COD_f – Fração altamente biodegradável do resíduo brasileiro.

De acordo com Birgemer e Crutzen (1987), apud Ensinas (2003, p. 29), a reação de COD dissociada (COD_f) indica a fração de carbono que é disponível para a decomposição bioquímica. Essa fração pode ser obtida através da Equação 4.

$$COD_f = 0,014 * T + 0,28 = 0,77 \quad (4)$$

Onde:

T – Temperatura ($^{\circ}C$) na zona anaeróbia dos resíduos, estimada em $35^{\circ}C$.

Ainda segundo Birgemer e Crutzen (1987), apud Ensinas (2003, p. 29), o restante é assimilado no material celular dos microrganismos durante a degradação da matéria orgânica.

O Fator de Correção do Metano (FCM), que avalia a qualidade do aterramento do lixo, considera que os resíduos aterrados de forma inadequada produzem quantidades menores de gás metano comparado com os resíduos

destinados em locais adequados, onde uma grande parte dos resíduos são decompostas em condições anaeróbicas (COELHO, ALENCAR e OLIVEIRA, 2010).

Os valores recomendados pelo IPCC para o FCM estão mencionados na Tabela 6.

Tabela 6 - Fator de correção de metano para as condições do aterro conforme o IPCC, 2006.

| Tipo de Local | FCM |
|--------------------------------------|-----|
| Adequado – aterro bem gerenciado | 1,0 |
| Inadequado – profundo (>5 m de lixo) | 0,8 |
| Inadequado – raso (<5 m de lixo) | 0,4 |

Fonte: IPCC (2006).

Vale ressaltar que o valor encontrado para o L_0 na Equação 3 será em $\text{kg CH}_4/\text{kg RSD}$ e deverá ser transformada para $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{tonRSD}$. Para isso deve-se dividir o valor encontrado de L_0 por $0,0007168 \text{ ton}/\text{m}^3$ (densidade do metano) (COELHO, ALENCAR e OLIVEIRA, 2010).

3.5 POTENCIAL DE ENERGIA EM KW QUE SERÁ PRODUZIDA

Com o resultado da emissão de gás metano gerado no aterro sanitário, realiza-se o cálculo com base no potencial de energia que o gás metano produz de acordo com análises realizadas em laboratório com amostras de gás metano, a fim de avaliar o potencial de energia elétrica em kW que será produzida no aterro sanitário. E esse valor pode-se dar em dia, mês ou ano.

Para realizar o cálculo do potencial de energia, deverá ser utilizada a Equação 5 a seguir.

$$P = \frac{Q * PCI * \eta}{860.000} \quad (5)$$

Onde:

P – Potência Disponível (MW);

Q – Vazão de gás metano do aterro sanitário ($\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{hora}$);

PCI – Poder Calorífico Inferior do metano. Caso o aterro não possua o valor real do PCI do metano, pode-se adotar $5.500 \text{ kcal}/\text{m}^3 \text{CH}_4$ (valor adotado para 50% de metano presente no biogás de aterro);

η – Eficiência de motores (geralmente é $28\% = 0,28$);

860.000 – Conversão de kcal para MW.

A partir do resultado encontrado na Equação 5, o valor é aplicado para encontrar a energia disponível no aterro sanitário de acordo com o tempo definido. A energia disponível pode ser encontrada através da Equação 06.

$$E = P * \text{Rend} * \text{Tempo de Operação} \quad (6)$$

Onde:

E – Energia Disponível (kWh/dia);

P – Potência Disponível (MW);

Rend – Rendimento de motores operando em plena carga (estimado em $87\% = 0,87$);

Tempo de Operação - Tempo de operação do motor = 24 horas/dia.

Com os dados a respeito da vazão do metano, é possível realizar os cálculos a partir das equações referentes a potência (MW) e a energia (kWh/dia) disponíveis no aterro sanitário ano após ano.

3.6 NÚMERO DE RESIDÊNCIAS A SER ATENDIDAS

A partir do resultado encontrado na equação da energia disponível no aterro sanitário em kWh/dia, será feito uma comparação com base na média mensal de energia gasta em uma residência a fim de avaliar o número de

residências que serão beneficiadas no município de Urussanga, Santa Catarina. Essa comparação é feita através da Equação 7:

$$R = \frac{E}{C} \quad (07)$$

Onde:

R – Número de residências a serem atendidas;

E – Energia Disponível (kWh/mês);

C – Consumo energético médio mensal de uma residência.

Ao final deste cálculo, se analisou a viabilidade da implantação do empreendimento, ou seja, realizou-se uma estimativa a partir de outros projetos referentes a essa forma de aproveitamento de energia, com base no custo de implantação de usinas com o abastecimento do mesmo porte ou aproximado, a fim de avaliar se a instalação da usina seria viável para este empreendimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PESAGEM DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

O aterro sanitário do Cirsures teve início de suas atividades no ano de 2004 e é responsável pela coleta dos resíduos sólidos domiciliares de sete municípios, sendo eles Cocal do Sul, Lauro Müller, Morro da Fumaça, Orleans, Siderópolis, Treviso e Urussanga.

Conforme último Censo IBGE 2010, o Cirsures atende uma população de mais de 90.795 mil pessoas. Anualmente são tratados 13.000 mil toneladas de resíduos. Os resíduos gerados pelos municípios integrantes do consórcio passam primeiramente por uma balança, onde são analisados os pesos dos caminhões e em seguida tabelados o peso dos resíduos em toneladas, conforme mencionado na Tabela 7. Após a pesagem, os resíduos sólidos são encaminhados para as células de disposição para a destinação final no aterro sanitário conforme Figura 7.

Tabela 7 - Quantidade de resíduos que chegam ao aterro sanitário do Cirsures nos períodos de 2007 a 2014, em (ton/mês).

| Anos | Toneladas/ano | Anos | Toneladas/ano |
|------|---------------|----------|---------------|
| 2007 | 12.084,38 | 2011 | 15.224,99 |
| 2008 | 12.496,50 | 2012 | 15.627,06 |
| 2009 | 13.145,01 | 2013 | 16.272,79 |
| 2010 | 13.646,41 | 2014 (1) | 12.470,43 |

Fonte: Do Autor.

1 Valores coletados até o final do mês de Agosto.

Conforme a tabela 7, podemos concluir de que com o passar dos anos, a tendência é que a quantidade de resíduos a serem dispostos continue aumentando, de forma que seja necessário realizar um planejamento para expansão da área do aterro sanitário para que haja o aumento da vida útil do mesmo. Em apêndice consta a tabela completa dos valores coletados de resíduos sólidos em cada cidade integrante do consórcio a partir do período de 2007.

Na Figura 7 é apresentada o processo a ser realizado no aterro sanitário, iniciando na pesagem dos resíduos sólidos e em seguida a realização

das anotações conforme o peso dos caminhões, para que os resíduos sólidos possam ser dispostos nas células de deposição.

Figura 7 - Processo de chegada e disposição final dos resíduos sólidos domiciliares no aterro sanitário do Cirsures. **Figura A** – Balança de pesagem. **Figura B** – Anotação dos valores. **Figura C** – Destinação final.



Fonte: Do autor (2014).

4.2 ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DO GÁS GERADO

Atualmente, o aterro sanitário apresenta 33 vias de drenagem de gás metano, sendo que 14 estão operando em queima contínua e outras 19 com queima intermitente. Cada queimador de gás metano possui uma distância média inferior a 30 metros de distância, proporcionando uma boa eficiência na drenagem dos gases emitidos. Esse processo evita que haja a formação de bolsões de gases metano no aterro sanitário (CIRSURES, 2014). Na Figura 8 é apresentado um dos drenos do aterro sanitário do Cirsures operando com queima contínua.

Figura 8 - Dreno de gás metano queimando de forma contínua.

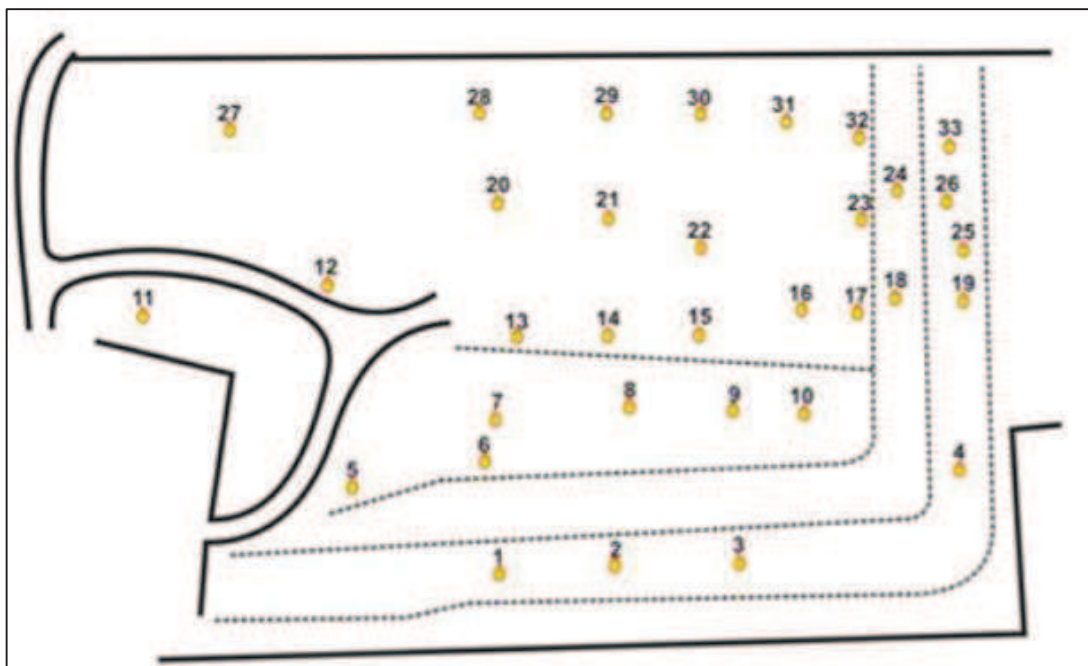


Fonte: Do autor (2014).

O sistema de drenagem de gás metano é instalado conforme o avanço da frente de serviço. As tubulações dos gases são perfurados e protegidos por brita nº 4, que tem também a função de drenante, agindo de forma a auxiliar no fluxo dos gases. Essa brita é sustentada por uma tela de aço galvanizado (CIRSURES 2014).

A localização das drenagens de gás metano no aterro sanitário pode ser explicada na Figura 9, onde é apresentado os locais de instalação das drenagens de gases, separadas pela numeração conforme o avanço das frentes de serviço.

Figura 9 - Localização dos drenos de gás metano no aterro sanitário do Cirsures.



Fonte: Cirsures (2014).

O gás metano gerado no aterro sanitário apresenta em suas características físicas uma coloração incolor e um odor suave, tendo sua alta emissão em dias quentes, devido à grande atividade das bactérias anaeróbicas presentes na decomposição dos resíduos sólidos.

As características químicas e algumas físicas do gás metano conforme mencionado no manual de produtos perigosos da CETESB, são citados na Tabela 8.

Tabela 8 - Características físico-químicas do gás metano composto no biogás do aterro sanitário do Cirsures, 2014.

| Propriedades | Composição |
|------------------------------|---------------|
| Peso Molecular | 16,04 |
| Temperatura Crítica | -82,05 °C |
| Calor de Combustão | -11.954 cal/g |
| Solubilidade na Água | Insolúvel |
| Ponto de Ebulição | -161,5 °C |
| Ponto de Fusão | -182,6 °C |
| Pressão Crítica | 45,44 atm |
| Pressão de Vapor | 760 mm Hg (1) |
| Densidade Relativa do Vapor | 0,55 - 1,0 |
| Calor Latente de Vaporização | 121,9 cal/g |
| Temperatura de Ignição | 540,4 °C |

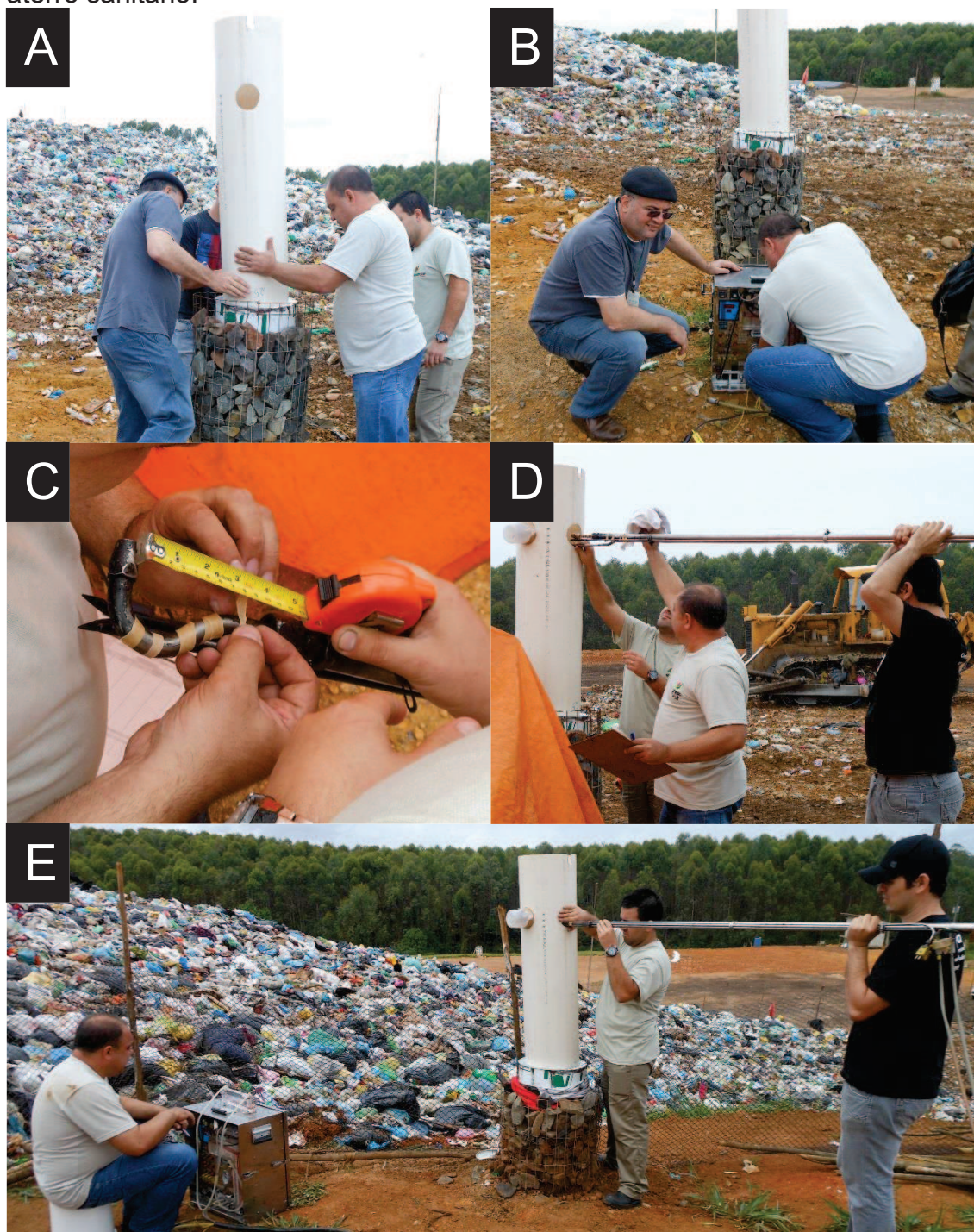
Fonte: CETESB (2003), modificado pelo autor.

1 A pressão de vapor é analisada a partir da temperatura do ponto de ebulição do gás.

Quanto ao poder calorífico do gás metano, considera-se que não foi possível realizar esta análise, pois o equipamento que seria utilizado não pode ser instalado a tempo. Com base em outras metodologias referentes ao tema deste trabalho, a estimativa para o poder calorífico do gás metano será de 5.500 kcal/m³. Essa estimativa é utilizada para composição de 50% de gás metano presente no biogás de aterro sanitário (ICLEI, 2009).

As características físicas do gás metano emitido no aterro sanitário foi realizada através da análise *in loco* no aterro sanitário, a partir da medição com o equipamento CIPA, foi possível definir as características de velocidade, pressão, temperatura e vazão do gás metano emitido no aterro sanitário. Primeiramente antes de realizar a implantação da chaminé foi extinguido a chama do dreno, para que possa ser emitido apenas o gás metano para a realização da análise. As amostragens foram realizadas em dois drenos localizados próximos a área de disposição atual dos resíduos sólidos. Na Figura 10 é apresentado o processo em etapas da coleta e análise do gás metano realizado no aterro sanitário do Cirsures.

Figura 10 - Procedimentos de montagem do equipamento para a análise do gás emitido no aterro sanitário do Cirsures. **Figura A** – Instalação da chaminé no dreno de gás metano. **Figura B** – Montagem do equipamento de análise do gás. **Figura C** – Marcação dos pontos onde serão coletados os dados dentro da chaminé. **Figura D** – Implantação da boquilha através da sonda dentro do flange da chaminé. **Figura E** – Coleta e análise do gás metano emitido no dreno do aterro sanitário.



Fonte: Do autor (2014).

A partir das etapas mencionadas na Figura 10, foram analisados os valores de pressão, velocidade, temperatura e vazão do gás emitido em dois drenos do aterro sanitário. Esses valores são mencionados na Tabela 9.

Tabela 9 - Características físicas do gás metano no aterro sanitário do Cirsures, 2014.

| Características | Valores Analisados | | | |
|--------------------------------------|--------------------|----------|--------|---------------|
| | Dreno 01 | Dreno 02 | Média | Desvio Padrão |
| Temperatura (°C) | 22 | 30 | 26 | 4 |
| Velocidade (m/s) | 1,25 | 1,27 | 1,26 | 0,01 |
| Vazão na Chaminé (m ³ /h) | 318,14 | 322,58 | 320,36 | 2,22 |
| Vazão CNTP (Nm ³ /h) (1) | 288,14 | 283,00 | 285,57 | 2,57 |

Fonte: Do autor.

1 Condições Normais de Temperatura e Pressão

Com base nas amostras coletadas em dois drenos do aterro sanitário, pode-se concluir de que a emissão de gás metano é baixa. Pode-se considerar de que está análise acabou obtendo algumas interferências, dentre elas destacam-se as condições climáticas que desfavoreciam a produção de gás metano no aterro sanitário. No momento da amostragem, as condições climáticas eram de umidade e chuva. Para que se obtenha uma análise eficiente do gás metano, é necessário que o clima esteja seco e ensolarado, favorecendo a atividade das bactérias anaeróbicas, responsáveis pela realização da decomposição dos resíduos sólidos e formação do gás metano.

Outro aspecto que desfavoreceu a amostragem é a fuga de gás metano através de fissuras formadas no solo utilizado para compactar os resíduos sólidos. Geralmente essa fuga ocorre pelo acúmulo de gás metano que não é direcionado para os drenos, sendo emitidos pelas fissuras que ali se abrem.

Para captura e valoração do gás metano, os aterros devem melhorar os quesitos operacionais, principalmente no que se refere aos cuidados com a compactação da massa de RSU, e a correta cobertura com argila compactada ao fechamento das células de disposição. Na Figura 11 é apresentada a fuga de gás metano em uma fissura encontrada no aterro sanitário do Cirsures.

Figura 11 - Fuga de gás metano no aterro sanitário do Cirsures.



Fonte: Do autor, 2014.

4.3 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA DOS RESÍDUOS

No contexto deste trabalho, o balanço de massa foi utilizado para separar os resíduos que contribuem para a geração do gás metano, dentre eles estão destacados a matéria orgânica, papéis, papelões, madeira e restos de tecido. Para a realização do balanço de massa, é necessário realizar a análise da composição gravimétrica dos resíduos depositados no aterro sanitário.

Quanto ao balanço de energia, buscou-se aplicá-lo de uma forma simplificada, com o objetivo de avaliar a produção energética do gás metano emitido no aterro sanitário, ou seja, avaliar o potencial energético total do gás metano, a fim de utilizá-lo em algum segmento de atividades futuras além do abastecimento público.

4.2.1 Balanço De Massa

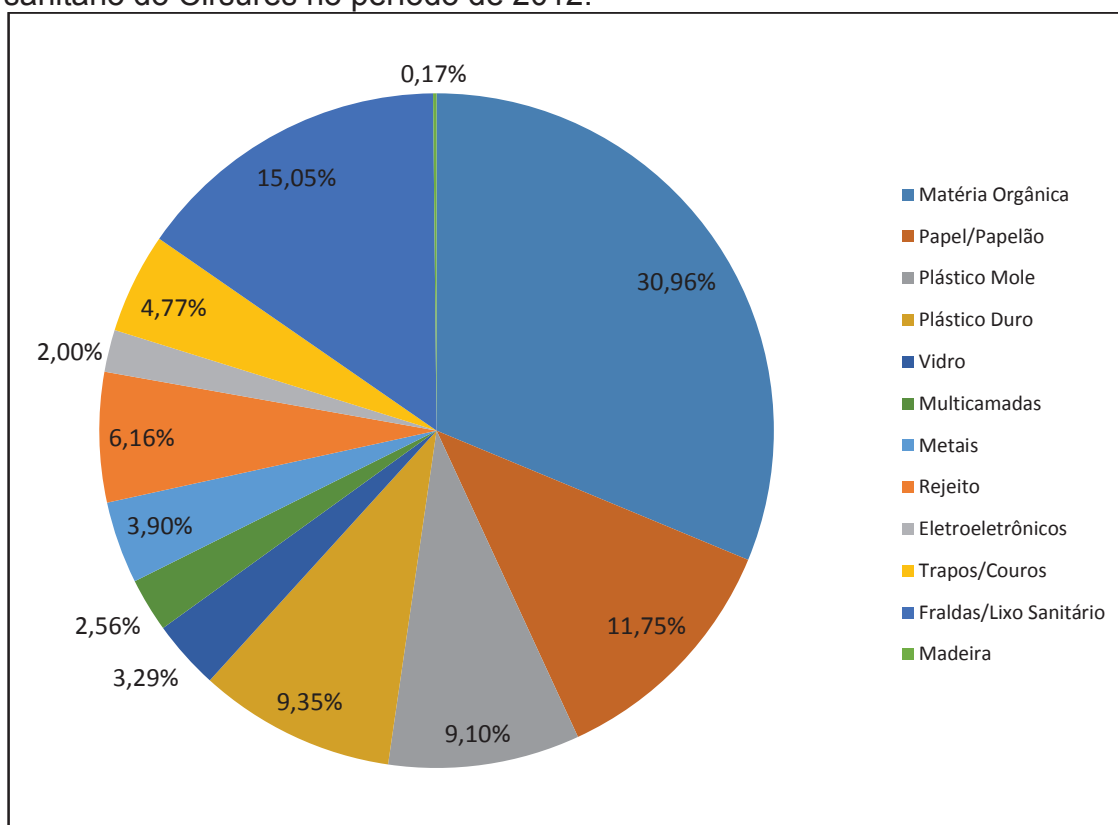
Para a realização do balanço de massa, primeiramente foi analisado a composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares. Segundo Monteiro et. al. (2001, p. 34), a composição gravimétrica traduz o percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra de lixo analisada.

O aterro sanitário do Cirsures realizou um estudo da composição gravimétrica dos resíduos sólidos no ano de 2012. A análise foi realizada a partir de duas a três amostragens por município integrante do consórcio, sendo uma amostra coletada em resíduos gerados na área urbana e outra na área rural. Nos municípios onde é feita a coleta seletiva, foi realizado um estudo contendo três amostras e as caracterizações dos resíduos foram feitas no local de disposição final dos RSU.

Os resíduos foram separados nos seguintes grupos: matéria orgânica, papel e papelão, plástico mole, plástico duro, vidro, multicamada, metais, rejeito, eletroeletrônicos, trapos, têxteis e couro, lixo sanitário, fraldas e madeira.

Na Figura 12 é apresentada a composição gravimétrica global dos resíduos sólidos urbanos realizada no aterro sanitário do Cirsures no ano de 2012.

Figura 12 - Composição gravimétrica global dos RSU presentes no aterro sanitário do Cirsures no período de 2012.



Fonte: IPAT (2013) p. 164-165.

Dentre os resíduos sólidos contidos na composição gravimétrica, serão necessários os percentuais de matéria orgânica, papel, papelão, trapos,

couros e madeiras, pois são os resíduos essenciais para a produção do gás metano através da digestão anaeróbica. Segundo Uczai (2012, p. 64), a digestão anaeróbica é o processo de degradação biológica da biomassa por bactérias, na ausência de oxigênio, produzindo biogás.

O balanço de massa do aterro sanitário do Cirsures pode ser observado na Tabela 10. Vale ressaltar que este balanço foi realizado a partir de uma média elaborada na disposição dos resíduos sólidos no aterro sanitário entre os períodos de 2007 a agosto de 2014.

Tabela 10 - Quantidade média de resíduos orgânicos e inorgânicos presentes no aterro sanitário do Cirsures entre os períodos de 2007 a agosto de 2014.

| Resíduos | Percentual (%) | Quantidade (ton/ano) |
|----------------------|----------------|----------------------|
| Total | 100 | 13.870,95 |
| Resíduos Orgânicos | 47,65 | 6.609,51 |
| Resíduos Inorgânicos | 52,35 | 7.261,44 |
| Matéria Orgânica | 30,96 | 4294,45 |
| Papel/Papelão | 11,75 | 1629,84 |
| Tapos/Couros | 4,77 | 661,64 |
| Madeira | 0,17 | 23,58 |

Fonte: Cirsures (2012), adaptado pelo autor.

Com base na Tabela 10, pode-se concluir de que anualmente, 47,65% dos resíduos sólidos urbanos que são depositados são responsáveis pela emissão do gás metano no aterro sanitário do Cirsures, ou seja, das 13.870,95 toneladas de resíduos que são depositados anualmente no aterro sanitário, 6.609,51 toneladas de resíduos são transformadas em gás metano.

4.2.2 Balanço de Energia

Para realização do balanço de energia, foi necessário analisar a vazão média de gás metano que é emitida nos drenos do aterro sanitário. Outro dado importante a ser analisado é o poder calorífico do gás metano, para que seja estimado o potencial de produção energética mensal do aterro sanitário.

Com base no tópico anterior, foi estimado um poder calorífico do gás metano de aproximadamente 5.500 kcal/m³. Essa estimativa é utilizada para composição de 50% de gás metano presente no biogás de aterro sanitário

(ICLEI, 2009). Vale ressaltar que esse valor do poder calorífico foi estimado devido a impossibilidade de realizar-se a análise do gás metano.

Já a vazão de emissão de gás metano analisado *in loco* é considerado baixa devido às interferências ocorridas durante a amostragem. Estas interferências estão relacionadas a vazão baixa de gás metano emitido e às condições desfavoráveis do clima, sendo necessário realizar a amostragem mais precisa em dias apropriados, ou seja, em dias secos e ensolarados, onde a geração de gás metano no aterro sanitário é mais eficiente.

Com isso, será realizada uma estimativa de emissão de gás metano no aterro sanitário, com base na média a partir da amostragem realizada em dois drenos e em condições normais de temperatura e pressão. Essa média será multiplicada com o número de drenos que estão operando com queima contínua. O aterro sanitário apresenta 14 drenos com queima contínua, ficando assim.

$$14 \text{ Drenos} * 285,57 \text{ Nm}^3/\text{hora} * 24 \text{ horas/dia} * 30 \text{ dias/mês} = 2,88 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mês}$$

O resultado é expresso mensalmente. Multiplicando este valor pelo poder calorífico do gás metano estimado para o aterro sanitário, obteremos o balanço de energia do aterro sanitário.

$$2,88 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mês} * 5.500 \text{ kcal/m}^3 \text{ CH}_4 = 1,60 \times 10^{10} \text{ kcal/mês}$$

Transformando o resultado em kWh/mês, concluiremos de que o potencial de produção energética mensal do aterro sanitário será de:

$$\frac{1,60 \times 10^{10} \text{ kcal/mês}}{860} = 18,60 \times 10^6 \text{ kWh/mês}$$

De acordo com o balanço de energia realizado, foi concluído que o aterro sanitário teria capacidade de produzir $18,60 \times 10^6$ kWh/mês de energia térmica a partir do gás metano emitido no aterro sanitário em condições normais de temperatura e pressão.

Foi considerado que o valor encontrado foi através de uma estimativa da produção normal de gás do aterro.

Num período mensal ensolarado, a produção de gás metano no aterro sanitário se elevaria 10 vezes mais do resultado encontrado, pois as bactérias responsáveis pela decomposição dos resíduos sólidos e geração do gás metano trabalham em temperaturas elevadas.

4.4 POTENCIAL ENERGÉTICO DO GÁS METANO

Algumas literaturas proporcionam metodologias com o enfoque para as estimativas teóricas da produção de gás metano em locais utilizados para a disposição de resíduos sólidos urbanos. Essas metodologias podem variar conforme suas considerações, complexidade e quantidade de dados que necessitam (COELHO, ALENCAR e OLIVEIRA, 2010).

Nesse contexto, apresenta-se uma estimativa teórica da geração de gás metano com base nas equações citadas, de forma a apresentar passo a passo o desenvolvimento do cálculo da emissão de metano em aterros sanitários.

A partir da estimativa teórica apresentada, realizaram-se novamente os cálculos com base nos valores reais de acordo com pesquisas e medições de campo da quantidade e concentração atual de gás metano, a fim de implantar uma usina de aproveitamento do biogás.

4.4.1 Cálculo do Potencial Energético do Gás Metano Estimado

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas de 1996, apresenta uma metodologia passo a passo de fácil compreensão para realizar o cálculo da emissão de metano a partir dos resíduos sólidos de acordo com as características de cada país ou conforme regiões específicas.

Nessa metodologia consta a estimativa da quantidade de carbono orgânico degradável presente nos resíduos sólidos, sendo assim, avaliando a quantidade de metano que poderá ser gerada a partir da quantidade de resíduos sólidos domiciliares depositados.

- **Cálculo de COD**

$$\text{COD} = \sum (\text{COD}_i * W_i)$$

$$\text{COD} = (0,4 * A) + (0,15 * B) + (0,4 * D) + (0,3 * E)$$

Onde:

A – Papel / Papelão = 5,00%

B – Restos de Alimentos = 60,00%

D – Tecidos = 7,00%

E – Madeira = 1%

$$\text{COD} = (0,4 * 5\%) + (0,15 * 60\%) + (0,4 * 7\%) + (0,3 * 1\%)$$

$$\text{COD} = 14.1\%$$

$$\text{COD} = 0,141$$

O resultado de COD encontra-se em porcentagem, sendo necessário dividi-lo por 100. Vale ressaltar que os valores utilizados em W_i são obtidos através da composição gravimétrica dos resíduos sólidos. Nesse cálculo foi considerado que na composição gravimétrica dos resíduos sólidos estão presentes papel/papelão, matéria orgânica, tecidos e madeira.

- **Cálculo de L_0**

Com o valor encontrado para fração de carbono orgânico do lixo (COD), o mesmo é aplicado para a equação do potencial de geração de metano do resíduo (L_0) a seguir:

$$L_0 = \text{FMC} * \text{COD} * \text{COD}_f * F * \frac{16}{12}$$

$$L_0 = 0,8 * 0,141 * 0,77 * 0,5 * \frac{16}{12}$$

$$L_0 = 0,06 \text{ kg CH}_4/\text{kg RSD}$$

O valor encontrado para L_0 deverá ser dividido pela densidade do metano, a fim de transformar o resultado encontrado em $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{ton RSD}$.

$$L_0 = \frac{0,06 \text{ kg CH}_4/\text{kg RSD}}{0,0007168 \text{ ton/m}^3}$$

$$L_0 = 80,78 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton RSD}$$

- **Cálculo da Emissão de Metano**

Para o cálculo da emissão de metano em aterros sanitários, é necessário obter os valores de k e Rx para dar início à equação. Na Tabela 3.3 do Módulo 5 – Resíduos, do Guia do IPCC, Volume 3: Disposição de Resíduos Sólidos, de 2006, é encontrado o valor de k para clima tropical – resíduo úmido, conforme a composição dos resíduos sólidos domiciliares. No Quadro 1 é apresentado os valores de k.

Quadro 1 - Valores de k conforme a zona onde situa-se os resíduos sólidos.

| Tipo de Resíduos | | Zona do Clima | |
|--|---|-------------------------------------|--------------|
| | | Tropical (TMA (1) > 20 °C) | |
| | | Úmido e Molhado (PMA (2) > 1000 mm) | |
| | | Faixa | Padrão (3) |
| Resíduos que se Degradam Lentamente | Papel / Resíduos Têxteis | 0,07 | 0,06 - 0,085 |
| | Madeira / Resíduos de Palha | 0,035 | 0,03 - 0,05 |
| Resíduos que se Degradam Moderadamente | Outros Resíduos Orgânicos Putrescíveis / Resíduos de Parque e Jardins | 0,17 | 0,15 - 0,2 |
| Resíduos que se Degradam Rapidamente | Resíduos Alimentares / Lodo de Esgoto | 0,4 | 0,17 - 0,7 |
| Resíduos em Massa | | 0,17 | 0,15 - 0,2 |

Fonte: IPCC 2006, modificado pelo autor.

1 Temperatura Média Anual

2 Precipitação Média Anual

3 Segundo o IPCC, os valores estão relacionados com o desvio padrão mínimo e máximo em relação ao valor da Faixa

A partir dos valores de k relacionados com as características dos resíduos, é obtida uma média referente a todos os valores de k. Essa média será de k = 0,09.

Quanto ao valor de Rx, é obtido através do levantamento de resíduos que são dispostos ao aterro sanitário anualmente. Como trata-se de um cálculo

estimado, supondo que o fluxo de resíduos que foram dispostos no aterro sanitário no ano de 2013 seja de 20.000 toneladas/ano. Descreve-se a equação da seguinte forma:

$$Q_{CH_4(2014)} = k * Rx * L_0 * e^{-k * (x - T)}$$

$$Q_{CH_4(2014)} = 0,09 * 20.000 \text{ ton/ano} * 83,71 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton RSD} * e^{-0,09 * (2014 - 2013)}$$

$$Q_{CH_4(2014)} = 145.406,25 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ano}$$

O resultado encontrado estará em anos e deverá ser transformado em $\text{m}^3 \text{ CH}_4/\text{hora}$, para isso deve-se dividir o resultado por 365 dias por ano e 24 horas por dia. Obtendo o seguinte resultado:

$$Q_{CH_4(2014)} = 16,60 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{hora}$$

Com base nas equações, é possível concluir de que a estimativa de emissão de gás metano para o aterro sanitário é de $16,60 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{hora}$. De acordo com o ICLEI (2009, p. 64), se a fração de metano presente no biogás for 50%, a quantidade de biogás será o dobro do valor de Q_{CH_4} , ou seja, será duas vezes a quantidade de metano obtida na equação da vazão de metano acima.

4.4.2 Cálculo do Potencial Energético do Gás Metano Mensurado

Com base no cálculo realizado com valores reais coletados em análises e pesquisas a campo, pode-se apresentar o potencial de geração de gás metano e energia disponível no aterro sanitário do Cirsures.

Utilizando as equações proposto pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas de 1996, realizaram-se cálculos a fim de avaliar o potencial de geração de gás metano no aterro sanitário do Cirsures e em seguida poder aplicá-lo ao tópico seguinte para avaliar o potencial de energia que será produzido a partir deste gás gerado, para uso na geração de energia elétrica.

Primeiramente calculou-se a quantidade de carbono orgânico degradável presente nos resíduos sólidos. Vale ressaltar que o valor do COD foi obtido através da composição do material que é depositado no aterro sanitário

conforme mencionado na Tabela 2.5 do Módulo 5 – Resíduos, do Guia do IPCC, Volume 2: Geração de Resíduos, de 2006 e mencionado na Tabela 05 deste trabalho.

- **Cálculo de COD**

$$\text{COD} = \sum (\text{COD}_i * W_i)$$

$$\text{COD} = (0,4 * A) + (0,15 * B) + (0,4 * D) + (0,3 * E)$$

Onde:

A – Papel / Papelão = 11,75%

B – Restos de Alimentos = 30,96%

D – Tecidos = 4,77%

E – Madeira = 0,17%

$$\text{COD} = (0,4 * 11,75\%) + (0,15 * 30,96\%) + (0,4 * 4,77\%) + (0,3 * 0,17\%)$$

$$\text{COD} = 11.30\%$$

$$\text{COD} = 0,113$$

Conforme mencionado no cálculo da estimativa teórica, o resultado de COD encontra-se em porcentagem, sendo necessário dividi-lo por 100. Os valores utilizados em W_i foram obtidos através da composição gravimétrica dos resíduos sólidos depositados no aterro do Cirsures, sendo eles papel/papelão, matéria orgânica, tecidos e madeira, conforme Tabela 10 – p. 48.

- **Cálculo de L_0**

A partir do resultado encontrado para fração de carbono orgânico do lixo (COD), este valor é aplicado para a equação do potencial de geração de metano do resíduo (L_0) a seguir:

$$L_0 = \text{FMC} * \text{COD} * \text{COD}_f * F * \frac{16}{12}$$

$$L_0 = 0,8 * 0,113 * 0,77 * 0,5 * \frac{16}{12}$$

$$L_0 = 0,046 \text{ kg CH}_4/\text{kg RSD}$$

Dividindo o valor encontrado para L_0 pela densidade do metano, obteve-se o seguinte resultado:

$$L_0 = \frac{0,046 \text{ kg CH}_4/\text{kg RSD}}{0,0007168 \text{ ton/m}^3}$$

$$L_0 = 64,74 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton RSD}$$

- **Cálculo da Emissão de Metano**

Conforme citado na estimativa teórica, para calcularmos a emissão de metano em aterros sanitários, é necessário obter os valores de k e R_x para dar início à equação. Na Tabela 3.3 do Módulo 5 – Resíduos, do Guia do IPCC, Volume 3: Disposição de Resíduos Sólidos, de 2006 e citado no Quadro 1 da página 52, é encontrado o valor de k para clima tropical – resíduo úmido, conforme a composição dos resíduos sólidos domiciliares.

A partir dos valores de k relacionados com as características dos resíduos, é obtida uma média referente a todos os valores de k . Sendo $k = 0,09$.

Quanto ao valor de R_x , é obtido através do levantamento de resíduos que são dispostos ao aterro sanitário anualmente. No ano de 2014 foram contabilizadas 12.470,43 toneladas de resíduos ao final do mês de agosto.

Portanto, descrevemos a equação da seguinte forma:

$$Q_{\text{CH}_4(2014)} = k * R_x * L_0 * e^{-k * (x - T)}$$

$$Q_{\text{CH}_4(2014)} = 0,09 * 12.470,43 \text{ ton/ano} * 64,74 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton RSD} * e^{-0,09 * (2014 - 2014)}$$

$$Q_{\text{CH}_4(2014)} = 72.659,74 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ano}$$

Conforme explicado no cálculo teórico, o resultado encontrado estará em anos e deverá ser transformado em $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{hora}$, para isso deve-se dividir o resultado por 365 dias por ano e 24 horas por dia. Obtendo o seguinte resultado:

$$Q_{\text{CH}_4(2014)} = 8,29 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{hora}$$

Com base nas equações acima é possível concluir de que a emissão de gás metano do aterro sanitário do Cirsures ao final do mês de agosto de 2014 é de $8,29 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{hora}$. Segundo ICLEI (2009, p. 64), se a fração de metano presente no biogás for 50%, a quantidade de biogás será o dobro do valor de Q_{CH_4} , ou seja, será duas vezes a quantidade de metano obtida na Equação 01.

Utilizando a equação acima, realizaram-se cálculos para avaliar o comportamento da geração do gás metano no aterro sanitário desde o ano de 2007 até o ano de 2014. Vale ressaltar que a produção de gás metano a partir do ano de 2007 não continua sendo a mesma para o ano de 2014, visto que é necessário considerar a constante de decaimento devido a degradação dos resíduos sólidos no aterro sanitário.

Como os períodos de 2004, 2005 e 2006 não foram tabelados os valores das pesagens, foi realizado uma correlação linear com estes períodos afim de encontrar a vazão de metano dos mesmos. Vale ressaltar de que o aterro sanitário está em operação desde o ano de 2004, fazendo-se necessário a vazão total do gás metano em todos os períodos de disposição dos resíduos sólidos no aterro, para que haja um resultado próximo do correto no cálculo. Os resultados são expressos na Tabela 11:

Tabela 11 - Geração de metano e biogás no aterro sanitário do Cirsures de acordo com os períodos de disposição dos resíduos sólidos em 2004 a 2014.

| Períodos | Especificações | |
|----------|---|---|
| | Geração de Metano (m ³ /hora) | Geração de Biogás (m ³ /hora) |
| 2004 (1) | 1,01 | 2,02 |
| 2005 (1) | 1,96 | 3,92 |
| 2006 (1) | 2,92 | 5,84 |
| 2007 | 4,28 | 8,56 |
| 2008 | 4,84 | 9,68 |
| 2009 | 5,57 | 11,14 |
| 2010 | 6,33 | 12,66 |
| 2011 | 7,73 | 15,46 |
| 2012 | 8,68 | 17,36 |
| 2013 | 9,89 | 19,78 |
| 2014 | 8,29 | 16,58 |
| Total | 61,50 | 123,00 |

Fonte: Do autor.

1 Valores retirados a partir da correlação linear.

4.5 POTENCIAL DE ENERGIA PRODUZIDA

Seguindo o processo metodológico, primeiramente foi realizado uma estimativa teórica do potencial de energia produzida no aterro sanitário de acordo com as equações subscritas na metodologia, de forma a explicar passo a passo o desenvolvimento dos cálculos do potencial de energia a ser produzido no aterro sanitário.

A partir da estimativa teórica apresentada, será realizado novamente os cálculos com base nos valores reais de acordo com pesquisas e medições de campo realizadas do poder calorífico inferior do gás metano, de forma a poder aplicar o valor real à equação.

4.5.1 Cálculo da Energia Disponível Estimada

Para realizar os cálculos referentes ao potencial de energia disponível em aterros sanitários, é necessário obter o Poder Calorífico Inferior (PCI) do gás metano. Como trata-se de uma estimativa teórica, será adotado para PCI o valor de 5.500 kcal/m³ CH₄ (valor utilizado para 50% do gás metano presente no biogás de aterro).

O valor utilizado para a vazão de gás metano no aterro será o resultado encontrado no cálculo estimado do tópico anterior, ou seja, será utilizado o valor de 16,60 m³ CH₄/hora. O cálculo pode ser expresso da seguinte forma:

$$P = \frac{(Q * PCI * \eta)}{860.000}$$

$$P = \frac{(16,60 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{hora} * 5.500 \text{ kcal/m}^3 \text{ CH}_4 * 0,28)}{860.000}$$

$$P = 0,030 \text{ MW}$$

Com o resultado encontrado do potencial de energia disponível, aplica-se este resultado na equação seguinte para encontrar a energia disponível no aterro sanitário. Vale ressaltar que para o cálculo de energia, deve-se considerar o rendimento de motores operando em plena carga como sendo de 87%. Sendo assim:

$$E = P * \text{Rend} * \text{Tempo de Operação}$$

$$E = 0,030 \text{ MW} * 0,87 * 24 \text{ horas/dia}$$

$$E = 0,62 \text{ MWh/dia}$$

Para transformar a unidade de energia de MWh para kWh, basta multiplicarmos o valor encontrado por 1000. Ficando assim:

$$E = 0,62 \text{ MWh/dia} * 1000 \text{ kWh/1 MWh}$$

$$E = 620 \text{ kWh/dia}$$

Com base nas equações de potência e energia disponível, foi concluído que o aterro sanitário tem capacidade de produzir estimados 620 kWh/dia para o ano de 2014.

4.5.2 Cálculo da Energia Disponível Real

Não foi possível realizar a análise do PCI do gás metano, pois o equipamento que seria utilizado não pode ser instalado a tempo. Com base em outras metodologias referentes ao tema deste trabalho, a estimativa para o poder calorífico do gás metano será de 5.500 kcal/m³. Essa estimativa é utilizada para composição de 50% de gás metano presente no biogás de aterro sanitário (ICLEI, 2009).

A vazão de gás metano no aterro sanitário será o resultado encontrado no cálculo do tópico anterior, ou seja, será utilizado o somatório das equações referentes a vazão do metano desde o início da operação do aterro sanitário, sendo o valor total de 61,50 m³ CH₄/hora. A partir desses dados, expressa-se o cálculo da seguinte forma:

$$P = \frac{(Q * PCI * \eta)}{860.000}$$

$$P = \frac{(61,50 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{hora} * 5.500 \text{ kcal/m}^3 \text{ CH}_4 * 0,28)}{860.000}$$

$$P = 0,11 \text{ MW}$$

Com o resultado encontrado do potencial de energia disponível, aplica-se este resultado na equação da energia disponível a seguir, ressaltando de que o rendimento de motores operando em plena carga é de 87%. Sendo assim:

$$E = P * \text{Rend} * \text{Tempo de Operação}$$

$$E = 0,11 \text{ MW} * 0,87 * 24 \text{ horas/dia}$$

$$E = 2,30 \text{ MWh/dia}$$

$$E = 2,30 \text{ MWh/dia} * 1000 \text{ kWh/1 MWh}$$

$$E = 2.300 \text{ kWh/dia}$$

Com base na metodologia proposta para a realização dos cálculos de potência e energia disponível, foi concluído que o aterro sanitário tem potencial energético capaz de produzir 2.300 kWh/dia até o final do mês de agosto de 2014.

4.6 NÚMERO DE RESIDÊNCIAS ATENDIDAS

Neste tópico, será avaliado o potencial de abastecimento energético do aterro sanitário, ou seja, quantas residências seriam possíveis atender com a demanda de gás emitida pelo aterro. Para isso, é necessário obter o valor encontrado na Equação 6, referente a energia disponível no aterro. Juntamente com esse valor, deverá ser analisado a média de consumo energético de uma residência, a fim de comparar quantas residências serão atendidas mensalmente pela energia advinda do aterro sanitário.

Realizou-se uma estimativa, com o objetivo de apresentar passo a passo o processo para obter-se o valor final e um segundo cálculo com os valores reais, a fim de concluir quantas residências o aterro sanitário do Cirsures é capaz de atender.

4.6.1 Cálculo do Número de Residências Atendidas - Estimado

Conforme encontrado no cálculo do tópico anterior, a estimativa energética do aterro sanitário é de 620 kWh/dia. Esse valor deverá ser multiplicado por 30 para que concentre-se em unidade mensal, ficando assim: 18.600 kWh/mês. Quanto ao consumo energético médio mensal de uma residência, será adotado o valor de 200 kWh/mês, ficando assim:

$$R = \frac{E}{C}$$

$$R = \frac{18.600 \text{ kWh / mês}}{200 \text{ kWh / mês}}$$

$$R = 93 \text{ Residências}$$

A partir da equação acima, foi concluído que o aterro sanitário tem capacidade energética de atender 93 residências. Vale ressaltar que esse atendimento é para os meses do ano de 2014, sendo necessário incluir os valores dos potenciais energéticos encontrado os anos anteriores, seguindo as equações dos tópicos anteriores, para obter-se o valor total de residências atendidas pelo aterro sanitário.

4.6.2 Cálculo do Número de Residências Atendidas - Real

Seguindo a metodologia da estimativa teórica, deverá ser transformado o resultado encontrado na Equação 6 referente a energia disponível no aterro sanitário de unidade diária para mensal. O valor final da equação de energia disponível no aterro sanitário encontrada no tópico anterior é de 2.300 kWh / dia. Multiplicando por 30 obtemos o seguinte valor: 69.000 kWh/mês.

A partir de análises junto a empresa responsável pelo abastecimento de energia elétrica do município de Urussanga, a Empresa Força e Luz de Urussanga Ltda. (EFLUL), atualmente, uma residência do município tem um consumo energético médio mensal de 200 kWh/mês. Com esse dado, aplica-se na seguinte equação para encontrar o número de residências que serão atendidas, ficando desta forma em:

$$R = \frac{E}{C}$$

$$R = \frac{69.000 \text{ kWh / mês}}{200 \text{ kWh / mês}}$$

R = 345 Residências

A partir da metodologia proposta para a realização deste trabalho, foi concluído que o aterro sanitário tem capacidade atual de produzir até 69.000 kWh/mês e atender até 345 residências do município de Urussanga, Santa Catarina.

Este valor deve ser considerado como um valor aproximado, pois a impossibilidade da realização da análise do poder calorífico do gás metano acabou levando uma alteração no valor real proposto por esse trabalho.

Porém, não deve descartar-se a hipótese de que o biogás emitido no aterro sanitário do Cirsures apresente em sua composição 50% de gás metano, levando ao resultado acima como um valor correto encontrado a partir das equações propostas na metodologia deste trabalho.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve como objetivo realizar uma identificação do potencial de geração de biogás e potencial energético para o aterro sanitário do Cirsures. Com isso, foi realizado um levantamento do potencial de produção de energia elétrica do aterro com base nas equações utilizadas pelo IPCC e outras metodologias, com o objetivo de avaliar o número de residências que seriam atendidas pela usina.

Com base nesse segmento, foi possível concluir de que o aterro sanitário tem um potencial energético medido/calculado com capacidade de produzir estimados $1,86 \times 10^{07}$ kWh/mês de energia térmica em condições normais de temperatura e pressão. A produção de biogás no aterro sanitário permite concluir que comportaria um sistema de geração de energia de até $6,9 \times 10^{07}$ kWh/mês e essa quantidade de energia permitiria atender até 345 residências.

Também pode-se concluir que considerando a curva de aumento de resíduos sólidos depositados no aterro sanitário, existe uma tendência que permite inferir que o número de residências beneficiadas tende a aumentar.

Para a realização desse levantamento, foram necessários a coleta de dados da quantidade de resíduos que foram dispostos no aterro sanitário desde o início das operações até o último mês que foi realizado esta análise. Junto disso, foi necessário mensurar a emissão de gás metano que é gerado no aterro a partir da metodologia proposta pelo IPCC, a fim de avaliar a quantidade de gás metano emitido desde o início da operação do aterro sanitário. Este valor encontrado foi aplicado a equação de potência e de energia para avaliar o potencial energético capaz de ser produzido pelo gás metano. Por fim, foi analisado o consumo médio mensal de uma residência no município de Urussanga para avaliar quantas residências seriam atendidas conforme o potencial energético produzido no aterro sanitário.

Dentre as dificuldades encontradas ao longo do trabalho, é possível destacar a análise físico-química do gás metano emitido no aterro sanitário. Essas dificuldades estiveram relacionadas com a inviabilidade das condições climáticas para a realização da amostragem de gás metano, sendo necessário utilizar o valor coletado para condições normais de temperatura e pressão, pois

no momento da amostragem, o clima encontrava-se úmido e chuvoso, interferindo na emissão de gás metano e pela vazão de gás na chaminé que encontrava-se abaixo do necessário para se realizar a amostragem. Outro fator a destacar foi do prazo para a instalação do cromatógrafo que não pode ser feito no período de tempo proposto para a realização deste trabalho, sendo necessário a coleta dessas informações a partir de outros trabalhos realizados nesse setor, impossibilitando que o resultado final do trabalho seja um valor real com base nas características e em dados coletados apenas no aterro sanitário.

Para possíveis projetos futuros na área do aterro sanitário do Cirsures, recomendamos a realização de um estudo de viabilidade para a instalação de painéis fotovoltaicos em taludes já consolidados do aterro sanitário, visando o aumento do potencial energético do mesmo, utilizando a energia coletada pelos painéis solares e pela queima do biogás da usina, aumentando também o número de residências que poderiam ser abastecidas pela energia elétrica gerada no aterro sanitário.

REFERÊNCIAS

- ABLP – Associação Brasileira De Limpeza Pública. **Curso Básico Sobre Aterro Sanitário**. Curitiba: ABLP, 2000. 123 p.
- ABREU, Maria de Fátima. **Do Lixo a Cidadania: estratégias para ação**. Brasília: Caixa, 2001. 94 p.
- ALVES, João Wagner Silva; VIEIRA, Sonia Maria Manso. **Inventário Nacional de emissões de metano pelo manejo de resíduos**. v. 1. São Paulo: CETESB, 1998. 87 p.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: Aneel, 2008. 236 p.
- ARRUDA, Paula Tonani Matteis de. **Responsabilidade civil decorrente da poluição por resíduos sólidos domésticos**. São Paulo: Método, 2004. 123 p.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.
- BRASIL. Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos e dá outras providências**. Brasília, DF. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 05 de ago. de 2014.
- BRITO FILHO, Luiz Fernandes de. **Estudo de Gases em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2004. 203 p. Disponível em: <http://www.getres.ufrj.br/pdf/FILHO_LFB_05_t_M_int.pdf>. Acesso em: 16 de ago. de 2014.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Manual de Produtos Químicos: Metano**. São Paulo: CETESB. Disponível em: <http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=METANO>. Acesso em: 27 de out. de 2014.
- CIRSURES. Consórcio Intermunicipal de Resíduos Sólidos Urbanos da Região Sul. **Ampliação do Aterro Sanitário: Memorial Descritivo e de Cálculo do Projeto de Ampliação do Aterro**. Santa Catarina, 2014. 74 p.
- CIRSURES. Consórcio Intermunicipal de Resíduos Sólidos Urbanos da Região Sul. **Operação do Aterro Sanitário**. Santa Catarina, 2014. 72 p.
- COELHO, T. C; ALENCAR, R; OLIVEIRA, R. F. S. **Estimativa da Produção Teórica do Metano Gerado no Aterro Sanitário de Palmas – TO**. Tocantins: UFT. v. 07, n. 12, p. 1458 – 1470, 2011. Disponível em:

<http://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/view/214/213>. Acesso em: 09 de ago. de 2014.

D'ALMEIDA, M. L. O; VILHENA, A. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. 2. ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000. 370 p.

ENSINAS, Adriano Viana. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas – SP**. São Paulo: UNICAMP, 2003. 129 p. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/mudancasclimaticas/biogas/file/docs/artigos_dissertacoes/ensinas.pdf>. Acesso em 25 de ago. de 2014.

FERNANDES, Dangelia Maria. et al. **Biomassa e Biogás da Suinocultura**. Paraná: UNIOESTE, 2012. 211 p. Disponível em: <http://projetos.unioeste.br/pos/media/File/energia_agricultura/pdf/Dissertacao_Dangela_M_Fernandes.pdf>. Acesso em: 19 de ago. de 2014.

FERREIRA, C. M. **Biodigestor para o Gás do Lixo Orgânico**. Minas Gerais: UNIBH, 2011, p. 5 – 17. Disponível em: <www.unibh.br/revistas/exacta/>. Acesso em: 02 de ago. de 2014.

GOMES, Sônia Maria da Silva; GARCIA, Cláudio. **Controladoria ambiental: gestão social, análise e controle**. São Paulo: Atlas, 2013. 313 p.

GUERRA, José Baltazar Sagueirinho Osório de Andrade; YOUSSEF, Youssef Ahmad. **As energias renováveis no Brasil: entre o mercado e a universidade**. Palhoça: Ed. Unisul, 2011. 231 p.

GONÇALVES, Pólita. **A Reciclagem Integradora dos Aspectos Ambientais, Sociais e Econômicos**. Rio de Janeiro: DP&A: Fase, 2003. 182 p.

ICLEI – Brasil – Governos Locais pela Sustentabilidade. **Manual para aproveitamento do biogás: v.1, aterros sanitários**. São Paulo: 2009. 80 p.

IEA. International Energy Agency. **Technology Roadmap: Bioenergy for Heat and Power**. França: OECD/IEA, 2012. 62 p.

IPAT/UNESC. Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas / Universidade do Extremo Sul Catarinense. **Plano Intermunicipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos dos Municípios Consorciados ao Cirsures, SC**. Criciúma, 2013. 311 p.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. Guia para inventários nacionais de gases de efeito estufa. **Módulo 6: Lixo**. Volume 2: Livro de trabalho, 1996. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6e.html>>. Acesso em: 20 de ago. de 2014.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. Geração de Resíduos, Composição e Gestão de Dados. **Módulo 5: Resíduos**. Volume 2: Disposição de Resíduos Sólidos, 2006. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/meetings/session25/doc4a4b/vol5.pdf>>. Acesso em: 20 de ago. de 2014.

LIMA, José Dantas de. **Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil**. João Pessoa: ABES, 2001. 267 p.

MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**: Versão Preliminar para Consulta Pública. Brasília, 2011. 102 p.

NICÉSIO, Raphael Gonçalves. Métodos Cromatográficos. **Biomedicina Brasil**, São Paulo, nov. de 2012. Seção Metodologia. Disponível em: <<http://www.biomedicinabrasil.com/2012/10/metodos-cromatograficos.html>>. Acesso em: 23 de out. de 2014.

OLIVEIRA, Daniele Lopes. **Mercado de Carbono no Brasil**. Goiás: Faculdade Delta, 2010. p. 11-37. Disponível em: <http://www.faculdadedelta.edu.br/revista/edicao_4/MERCADO_DE_CARBONO_NO_BRASIL_ano1_ed4_pg_11_37.pdf>. Acesso em: 16 de out. de 2014.

OSTENBERG, Bernd. Estabelecimento de uma estrutura municipal organizacional e administrativa como base para uma gestão moderna de resíduos sólidos e reciclagem no Brasil. In: Workshop em Rostock, 1., 2013, Alemanha. **Tópicos Temáticos**. Rostock: Umwelt GmbH, 2013. p. 2-20.

POPPE, Marcelo Khaled; LA ROVERE, E. Lebre. Mudança do clima. Brasília: NAE, 2005. v.2. 500 p.

RODRIGUES, Ciro Daré. **Análise de Viabilidade de Implantação de Biodigestor na Volkswagen do Brasil – Planta Anchieta – São Bernardo do Campo – SP**. São Paulo: USP, 2010. 55 p. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/biblioteca/producao/2010/Monografias/Monografia_Biodigestor_Final_CIRO_ev_final.pdf>. Acesso em 05 de ago. de 2014.

UCZAI, Pedro. **Energias renováveis**: riqueza sustentável ao alcance da sociedade. Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2012. 273 p.

APÊNDICE

APÊNDICE 1

Quadro da quantidade de resíduos sólidos dispostos mensalmente no aterro sanitário do Cirsures por cada município integrante do Consórcio a partir do período de 2007

| Município | jan/07 | fev/07 | mar/07 | abr/07 | mai/07 | jun/07 | jul/07 | ago/07 | set/07 | out/07 | nov/07 | dez/07 | Total |
|------------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Cocal do Sul | 185,04 | 180,21 | 209,01 | 189,96 | 212,01 | 199,08 | 195,10 | 194,35 | 184,87 | 203,76 | 196,10 | 203,39 | 2352,88 |
| Lauro Muller | 113,44 | 89,16 | 109,73 | 124,75 | 112,07 | 109,01 | 105,22 | 107,99 | 94,16 | 109,62 | 105,87 | 102,94 | 1283,96 |
| Morro da Fumaça | 193,65 | 189,72 | 221,42 | 208,36 | 221,42 | 204,72 | 207,12 | 206,36 | 193,97 | 218,57 | 206,03 | 201,01 | 2472,35 |
| Orleans | 214,66 | 202,83 | 236,25 | 220,58 | 233,17 | 227,63 | 233,35 | 226,41 | 222,09 | 245,77 | 229,75 | 249,35 | 2741,84 |
| Treviso | 34,41 | 32,56 | 34,03 | 33,03 | 38,06 | 33,71 | 33,28 | 33,53 | 32,98 | 40,16 | 32,95 | 39,87 | 418,57 |
| Urussanga | 220,40 | 198,03 | 246,20 | 233,18 | 242,22 | 229,66 | 240,92 | 240,46 | 222,84 | 253,52 | 236,30 | 251,05 | 2814,78 |
| TOTAL | 961,60 | 892,51 | 1056,64 | 1009,86 | 1058,95 | 1003,81 | 1014,99 | 1009,10 | 950,91 | 1071,40 | 1007,00 | 1047,61 | 12084,38 |

| Município | jan/08 | fev/08 | mar/08 | abr/08 | mai/08 | jun/08 | jul/08 | ago/08 | set/08 | out/08 | nov/08 | dez/08 | Total |
|------------------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Cocal do Sul | 191,81 | 189,60 | 199,85 | 199,51 | 207,09 | 191,70 | 209,15 | 184,51 | 192,09 | 201,28 | 197,50 | 213,24 | 2377,33 |
| Lauro Muller | 98,30 | 79,13 | 110,67 | 122,58 | 106,36 | 97,96 | 118,50 | 94,38 | 95,89 | 121,69 | 76,34 | 72,38 | 1194,18 |
| Morro da Fumaça | 211,00 | 196,18 | 208,37 | 219,14 | 221,69 | 199,43 | 221,03 | 203,67 | 207,25 | 209,18 | 206,53 | 218,94 | 2522,41 |
| Orleans | 227,44 | 227,53 | 241,59 | 234,29 | 250,31 | 230,69 | 245,26 | 225,21 | 237,82 | 261,26 | 238,94 | 277,03 | 2897,37 |
| Treviso | 37,70 | 36,87 | 37,89 | 39,65 | 47,20 | 38,26 | 38,50 | 32,88 | 37,25 | 34,72 | 43,42 | 49,30 | 473,64 |
| Urussanga | 242,12 | 235,15 | 234,20 | 245,83 | 250,49 | 238,39 | 258,02 | 242,07 | 235,77 | 271,09 | 267,98 | 310,46 | 3031,57 |
| TOTAL | 1008,37 | 964,46 | 1032,57 | 1061,00 | 1083,14 | 996,43 | 1090,46 | 982,72 | 1006,07 | 1099,22 | 1030,71 | 1141,35 | 12496,50 |

| Município | jan/09 | fev/09 | mar/09 | abr/09 | mai/09 | jun/09 | jul/09 | ago/09 | set/09 | out/09 | nov/09 | dez/09 | Total |
|------------------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Cocal do Sul | 198,41 | 153,48 | 222,04 | 207,05 | 194,70 | 196,26 | 201,15 | 203,95 | 214,18 | 206,97 | 213,33 | 250,91 | 2462,43 |
| Lauro Muller | 74,94 | 96,54 | 120,65 | 119,71 | 92,41 | 113,60 | 188,05 | 118,36 | 117,83 | 130,04 | 133,90 | 149,30 | 1455,33 |
| Morro da Fumaça | 207,88 | 185,21 | 231,93 | 212,10 | 206,81 | 214,98 | 220,92 | 218,31 | 230,98 | 224,65 | 221,55 | 244,32 | 2619,64 |
| Orleans | 231,50 | 214,11 | 264,91 | 242,63 | 242,09 | 241,83 | 261,13 | 254,93 | 262,69 | 262,25 | 260,96 | 279,62 | 3018,65 |
| Treviso | 36,90 | 37,61 | 42,73 | 39,63 | 35,75 | 40,51 | 40,62 | 41,01 | 41,58 | 38,56 | 43,23 | 45,52 | 483,65 |
| Urussanga | 251,58 | 219,95 | 291,07 | 240,53 | 240,38 | 254,91 | 249,46 | 283,08 | 242,03 | 258,84 | 266,73 | 306,75 | 3105,31 |
| TOTAL | 1001,21 | 906,90 | 1173,33 | 1061,65 | 1012,14 | 1062,09 | 1161,33 | 1119,64 | 1109,29 | 1121,31 | 1139,70 | 1276,42 | 13145,01 |

| Município | jan/10 | fev/10 | mar/10 | abr/10 | mai/10 | jun/10 | jul/10 | ago/10 | set/10 | out/10 | nov/10 | dez/10 | Total |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Cocal do Sul | 203,70 | 184,56 | 221,99 | 177,99 | 218,63 | 216,94 | 220,98 | 215,51 | 214,89 | 215,22 | 231,63 | 245,69 | 2567,73 |
| Lauro Muller | 140,97 | 111,18 | 121,40 | 42,49 | 87,61 | 106,32 | 126,78 | 118,99 | 85,79 | 128,03 | 186,64 | 209,47 | 1465,67 |
| Morro da Fumaça | 218,44 | 201,94 | 244,05 | 195,95 | 250,93 | 228,00 | 231,82 | 224,11 | 226,22 | 228,61 | 241,37 | 273,52 | 2764,96 |
| Orleans | 248,95 | 233,59 | 272,93 | 233,95 | 269,39 | 264,09 | 263,92 | 251,97 | 253,37 | 262,39 | 262,54 | 303,15 | 3120,24 |
| Treviso | 37,33 | 39,18 | 44,73 | 35,42 | 42,71 | 40,96 | 34,83 | 40,00 | 43,30 | 35,89 | 42,45 | 46,08 | 482,88 |
| Urussanga | 233,90 | 244,12 | 276,92 | 262,85 | 263,65 | 304,38 | 306,23 | 258,78 | 255,68 | 248,19 | 273,96 | 316,27 | 3244,93 |
| TOTAL | 1083,29 | 1014,57 | 1182,02 | 948,65 | 1132,92 | 1160,69 | 1184,56 | 1109,36 | 1079,25 | 1118,33 | 1238,59 | 1394,18 | 13646,41 |

| Município | jan/11 | fev/11 | mar/11 | abr/11 | mai/11 | jun/11 | jul/11 | ago/11 | set/11 | out/11 | nov/11 | dez/11 | Total |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Cocal do Sul | 289,93 | 288,16 | 244,55 | 220,96 | 243,75 | 232,07 | 226,12 | 250,03 | 231,60 | 234,08 | 239,98 | 261,69 | 2962,92 |
| Lauro Muller | 161,92 | 172,87 | 120,54 | 143,58 | 149,55 | 95,30 | 157,80 | 165,45 | 126,35 | 116,17 | 162,53 | 159,94 | 1732,00 |
| Morro da Fumaça | 297,75 | 296,02 | 253,38 | 231,05 | 243,70 | 245,88 | 244,24 | 275,03 | 250,91 | 234,69 | 243,70 | 256,23 | 3072,58 |
| Orleans | 348,37 | 340,21 | 271,73 | 253,00 | 278,60 | 259,82 | 268,47 | 280,86 | 262,93 | 251,00 | 258,68 | 288,97 | 3362,64 |
| Treviso | 55,64 | 53,40 | 43,60 | 34,41 | 46,64 | 39,11 | 41,37 | 44,77 | 36,12 | 41,24 | 36,55 | 44,77 | 517,62 |
| Urussanga | 344,13 | 347,45 | 286,72 | 271,72 | 285,79 | 279,31 | 275,73 | 307,77 | 281 | 276,44 | 323,31 | 297,86 | 3577,23 |
| TOTAL | 1497,74 | 1498,11 | 1220,52 | 1154,72 | 1248,03 | 1151,49 | 1213,73 | 1323,91 | 1188,91 | 1153,62 | 1264,75 | 1309,46 | 15224,99 |

| Município | jan/12 | fev/12 | mar/12 | abr/12 | mai/12 | jun/12 | jul/12 | ago/12 | set/12 | out/12 | nov/12 | dez/12 | Total |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Cocal do Sul | 279,59 | 275,45 | 243,47 | 225,83 | 261,43 | 245,80 | 251,03 | 258,46 | 228,17 | 270,72 | 239,41 | 224,39 | 3003,75 |
| Lauro Muller | 164,59 | 169,68 | 178,79 | 178,34 | 153,88 | 142,24 | 158,91 | 165,95 | 135,14 | 163,25 | 86,36 | 165,61 | 1862,74 |
| Morro da Fumaça | 285,73 | 267,35 | 237,78 | 233,84 | 261,54 | 242,37 | 252,50 | 257,18 | 230,16 | 271,23 | 246,87 | 248,25 | 3034,80 |
| Orleans | 355,29 | 309,16 | 270,48 | 261,17 | 288,08 | 292,75 | 293,24 | 282,31 | 287,92 | 294,56 | 291,96 | 313,15 | 3540,07 |
| Treviso | 53,34 | 55,82 | 37,91 | 44,41 | 43,76 | 47,83 | 51,63 | 48,38 | 44,69 | 52,87 | 50,41 | 52,01 | 583,06 |
| Urussanga | 332,94 | 303,61 | 292,28 | 277,02 | 298,6 | 305,33 | 276,43 | 301,99 | 284,23 | 316,54 | 291,86 | 321,81 | 3602,64 |
| TOTAL | 1471,48 | 1381,07 | 1260,71 | 1220,61 | 1307,29 | 1276,32 | 1283,74 | 1314,27 | 1210,31 | 1369,17 | 1206,87 | 1325,22 | 15627,06 |

| Município | jan/13 | fev/13 | mar/13 | abr/13 | mai/13 | jun/13 | jul/13 | ago/13 | set/13 | out/13 | nov/13 | dez/13 | Total |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Cocal do Sul | 282,39 | 252,10 | 258,11 | 262,36 | 246,03 | 232,24 | 260,77 | 249,65 | 239,78 | 255,52 | 240,18 | 259,66 | 3038,79 |
| Lauro Muller | 291,47 | 165,62 | 181,87 | 171,90 | 168,20 | 114,45 | 168,47 | 152,60 | 160,73 | 184,35 | 168,91 | 195,81 | 2124,38 |
| Morro da Fumaça | 264,44 | 251,82 | 260,28 | 277,88 | 259,91 | 238,93 | 272,02 | 259,92 | 259,86 | 271,72 | 245,62 | 262,55 | 3124,95 |
| Orleans | 321,14 | 303,42 | 335,34 | 313,76 | 316,09 | 302,29 | 316,35 | 311,12 | 294,48 | 304,65 | 298,13 | 323,30 | 3740,07 |
| Treviso | 55,02 | 54,65 | 57,49 | 55,76 | 53,38 | 43,95 | 57,25 | 51,46 | 54,05 | 53,10 | 51,15 | 56,53 | 643,79 |
| Urussanga | 334,34 | 309,35 | 318,34 | 304,84 | 300,4 | 274,34 | 301,21 | 280,56 | 286,8 | 299,67 | 287,69 | 303,27 | 3600,81 |
| TOTAL | 1548,80 | 1336,96 | 1411,43 | 1386,50 | 1344,01 | 1206,20 | 1376,07 | 1305,31 | 1295,70 | 1369,01 | 1291,68 | 1401,12 | 16272,79 |

| Município | jan/14 | fev/14 | mar/14 | abr/14 | mai/14 | jun/14 | jul/14 | ago/14 | set/14 | out/14 | nov/14 | dez/14 | Total |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|--------|--------|--------|-----------------|
| Cocal do Sul | 250,67 | 234,20 | 253,42 | 249,71 | 256,29 | 238,99 | 261,83 | 228,17 | | | | | 1973,28 |
| Lauro Muller | 170,55 | 150,35 | 162,34 | 154,34 | 189,21 | 268,53 | 222,21 | 370,07 | | | | | 1687,60 |
| Morro da Fumaça | 262,67 | 238,39 | 255,63 | 269,69 | 265,80 | 263,13 | 279,22 | 249,61 | | | | | 2084,14 |
| Orleans | 294,16 | 270,21 | 299,78 | 309,12 | 310,65 | 325,23 | 318,92 | 291,94 | | | | | 2420,01 |
| Treviso | 53,10 | 47,83 | 53,88 | 53,08 | 49,86 | 54,12 | 48,49 | 46,27 | | | | | 406,63 |
| Urussanga | 281,04 | 266,43 | 289,80 | 296,87 | 301,53 | 292,75 | 308,32 | 285,43 | | | | | 2322,17 |
| Siderópolis | 205,67 | 179,08 | 208,38 | 184,11 | 198,46 | 204,28 | 210,12 | 186,50 | | | | | 1576,60 |
| TOTAL | 1517,86 | 1386,49 | 1523,23 | 1516,92 | 1571,80 | 1647,03 | 1649,11 | 1657,99 | | | | | 12470,43 |

ANEXO

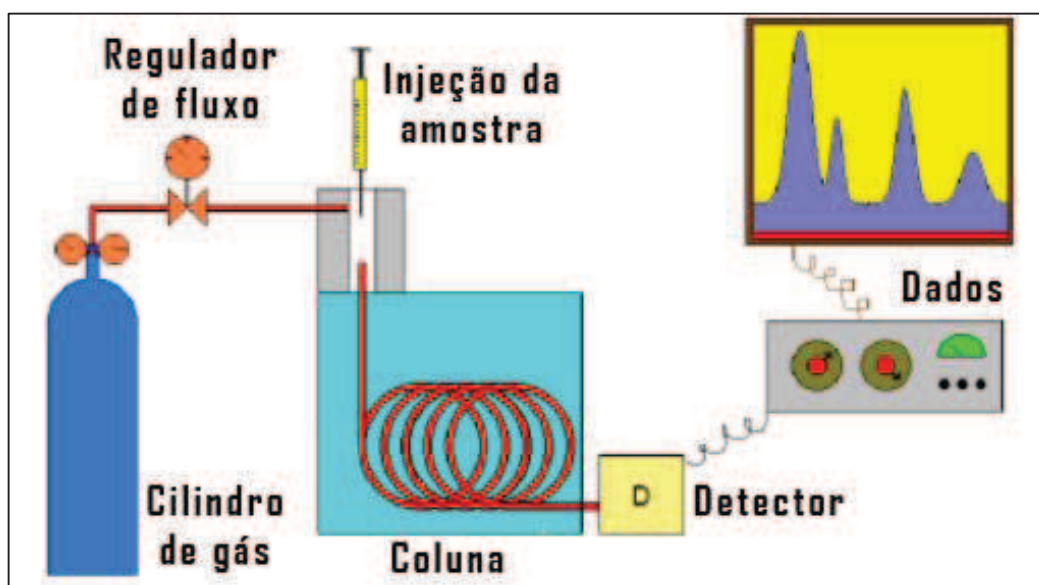
Anexo 1 – Metodologia utilizada para a caracterização físico-química do gás produzido no aterro sanitário.

Essa etapa será realizada in loco, onde será feito uma coleta de amostras do gás metano que é produzido nos drenos do aterro sanitário e em seguida leva-las ao laboratório para serem feitas as análises das suas características físico-químicas, a fim de avaliar seu potencial de produção de energia elétrica.

A análise dos gases será feita através do estudo laboratorial com o cromatógrafo. O cromatógrafo funciona através da entrada de um gás de arraste, geralmente nitrogênio, hélio, hidrogênio e argônio, que são armazenados sobre uma alta pressão e que acaba impulsionando a amostra inserida através de uma seringa com o volume necessário a ser injetado no injetor do equipamento. Esse injetor deverá estar aquecido para que a amostra de gás possa evaporar de forma mais rápida para o forno de colunas através do arraste do aerossol da amostra. Depois de separados no forno de colunas, os componentes atravessam o detector enviando imediatamente o sinal e registrando os dados na forma de um cromatograma.

Na Figura 13 é apresentado as etapas de funcionamento do cromatógrafo para análise de gases.

Figura 13 - Princípio de funcionamento do cromatógrafo para análise de gases através da cromatografia.



Fonte: Nicésia (2012).

Para a análise de outras características dos gases que não são analisados pelo cromatógrafo, será utilizado o Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos (CIPA). Esse equipamento consiste basicamente no monitoramento de velocidades, temperaturas, pressões e vazões dos gases emitidos. O princípio de funcionamento consiste em demarcar os pontos onde serão feitas as amostragens dentro da chaminé. Com isso, pode ser utilizado uma fita e uma trena para medir as distâncias de cada ponto que serão coletados. Após essa marcação, é inserido a boquilha através de uma sonda pelo flange da chaminé para que sejam coletadas amostras do gás em pontos diferentes no interior da chaminé conforme a marcação na boquilha.

Durante a coleta de amostras, os parâmetros de velocidade e temperatura dos gases são constantemente monitorados, e a vazão é ajustada de forma periódica, para que a velocidade na boquilha do equipamento seja igual a velocidade dos gases e misturas de partículas no interior da chaminé.