

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
ESPECIALIZAÇÃO EM GESTÃO AMBIENTAL EM MUNICÍPIOS**

ANDERSON BORGES

**CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PELO PROCESSO DE
INCINERAÇÃO NO MUNICÍPIO DE XANXERÊ - SC**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

MEDIANEIRA - PR

2018

ANDERSON BORGES



**CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PELO PROCESSO DE
INCINERAÇÃO NO MUNICÍPIO DE XANXERÊ – SC**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista na Pós Graduação em Gestão Ambiental em Municípios - Polo UAB do Município de Concórdia - SC Modalidade de Ensino a Distância, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR - Campus Medianeira.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Dangelma Maria Fernandes

MEDIANEIRA - PR

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

Caracterização dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica pelo processo de incineração no município de Xanxerê - SC

Por

Anderson Borges

Esta monografia foi apresentada às 11:30 do dia 18 de agosto de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista no Curso de Especialização em Gestão Ambiental em Municípios - Polo de Concórdia - SC Modalidade de Ensino a Distância, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Medianeira. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Prof^a. Dra. Dangela Maria Fernandes
UTFPR - Campus Medianeira
(Orientadora)

Prof^a. Dra. Carla Cristina Bem
UTFPR - Campus Medianeira

Prof^a. Dra. Eliane Rodrigues dos Santos Gomes
UTFPR - Campus Medianeira

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso. -

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que me permitiu que tudo isso acontecesse ao longo de minha vida e que até aqui tem demonstrado seu grande amor para comigo, através de suas bênçãos maravilhosas nesta longa caminhada aqui na terra. Agradeço pelos bons momentos que me fizeram celebrar a vida, agradeço também pelos momentos difíceis que me fizeram crescer e ser quem eu sou.

Aos meus pais, que sempre me incentivaram e apoiaram, para que eu atingisse este objetivo de vida, bem como pela educação moral. Inspiraram-me a certeza das suas presenças e a segurança de seus passos guiando os meus. O carinho das suas vozes, a esperança dos seus sorrisos, o conforto de suas lágrimas, o brilho de seus olhares me fez tão grande quanto o teu amor por mim.

Agradeço aos professores do curso de Especialização em Gestão Ambiental em Municípios da UTFPR, Campus Medianeira que desempenharam com dedicação as aulas ministradas. Em especial, a minha orientadora professora Dra. Dangel Maria Fernandes pelas orientações ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço aos tutores presenciais e a distância que nos auxiliaram no decorrer da pós-graduação.

Muito obrigado também a minha namorada, Amanda Cristine Favretto que esteve comigo nesta caminhada e pode presenciar toda minha luta, e principalmente pela compreensão em minhas ausências e por todo seu amor.

Enfim, sou grato a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para realização desta monografia.

“O lixo é a energia do futuro e quando for colocado em funcionamento o planeta ficará bem melhor”. (MÁRIO PEREIRA GOMES)

RESUMO

BORGES, Anderson. **Caracterização dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica pelo processo de incineração no município de Xanxerê - SC.** 2018. 51 folhas. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental em Municípios). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2018.

A fim de aumentar a vida útil do aterro sanitário municipal, gerar energia e rentabilidade ao município, o objetivo do trabalho foi caracterizar os resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica pelo processo de incineração no município de Xanxerê - SC. Para tanto, a metodologia se baseou em entrevista com a equipe técnica responsável pelo aterro sanitário municipal, realização de análise gravimétrica do resíduo sólido urbano disposto no aterro sanitário pela técnica do quarteamento, e posteriormente se calculou o poder calorífico e a geração de energia elétrica do material através de modelos matemáticos. Os resultados apresentaram que pela caracterização quantitativa do resíduo, o aterro sanitário recebe em média 900.100,00 kg/mês, assim tem uma geração per capita de resíduos sólidos urbanos de 0,77 kg/hab.dia para o município de Xanxerê - SC. Quanto a caracterização gravimétrica média se obteve que aproximadamente 90,60% dos resíduos sólidos podem ser usados como combustível, enquanto apenas 9,40% são caracterizados como não combustíveis (vidros e metais). O poder calorífico médio calculado foi de 2.408,09 kcal/kg, de modo que a média de energia gerada foi 366.970,77 kWh/mês, sendo possível a instalação de uma usina termoelétrica de 1 MW com um fator de capacidade de 0,5, ou seja, poderá operar aproximadamente 50% do tempo na sua capacidade total. Portanto, através do processo de incineração é possível reduzir significativamente o volume de resíduos sólidos urbanos e conseqüentemente a área destinada ao aterro sanitário.

Palavras-chave: Análise Gravimétrica. Resíduos Sólidos. Poder Calorífico.

ABSTRACT

BORGES, Anderson. **Characterization of municipal solid waste for electricity generation in the municipality of Xanxerê - SC through incineration.** 51 sheets. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental em Municípios). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2018.

In order to increase the useful life of the municipal landfill, to generate energy and profitability to the municipality, the objective of this work was to characterize municipal solid waste for electric energy generation by the incineration process in the municipality of Xanxerê - SC. To do so, the methodology was based on an interview with the technical team responsible for the municipal sanitary landfill, a gravimetric analysis of the urban solid waste disposed in the landfill by the quarrying technique, and later the calorific value and the electric power generation of the material through mathematical models. The results showed that, due to the quantitative characterization of the residue, the landfill receives an average of 900,100.00 kg / month, so there is a per capita generation of urban solid waste of 0.77 kg / hab.day for the municipality of Xanxerê - SC. Regarding the average gravimetric characterization, it was obtained that approximately 90.60% of solid waste can be used as fuel, while only 9.40% are characterized as non-combustible (glass and metals). The calculated average calorific value was 2,408.09 kcal / kg, so that the average energy generated was 366,970.77 kWh / month, being possible to install a 1 MW thermoelectric plant with a capacity factor of 0.5 , that is, it can operate approximately 50% of the time in its total capacity. Therefore, through the incineration process it is possible to significantly reduce the volume of urban solid waste and consequently the landfill area.

Keywords: Gravimetric analysis. Solid waste. Calorific power.

LISTA DE SIGLAS

| | |
|---------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| BEN | Balanco Energético Nacional |
| CFB | Clima Temperado Úmido |
| EG | Energia Gerada |
| EMG | Energia Mensal Gerada |
| EPE | Empresa de Pesquisas Energéticas |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| MO | Matéria Orgânica |
| NBR | Normas Brasileiras |
| PCI | Poder Calorífico Inferior |
| PCS | Poder Calorífico Superior |
| PROINFA | Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica |
| RSU | Resíduos Sólidos Urbanos |
| SIN | Sistema Interligado Nacional |
| WTE | <i>Waste to Energy</i> |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Classificação dos Resíduos Sólidos. | 14 |
| Figura 2 - Geração Total e Per Capita de Resíduos Sólidos Urbanos para a Região Sul. | 16 |
| Figura 3 - Disposição Final de RSU no Brasil por Tipo de Destinação (t/dia). | 17 |
| Figura 4 - Planta Modelo de Uma Usina Convencional de Incineração de RSU. | 20 |
| Figura 5 - Mapa de Localização do Município de Xanxerê - SC. | 21 |
| Figura 6 - Aterro Sanitário Municipal. | 22 |
| Figura 7 - A) Caminhão Coletor; B) Resíduos Sólidos Urbanos. | 24 |
| Figura 8 - Método do Quarteamento. | 25 |
| Figura 9 - Técnica do Quarteamento. | 26 |
| Figura 10 - Caracterização Quantitativa dos Resíduos Sólidos Urbanos Mensais. | 32 |
| Figura 11 - Geração Per Capita de Resíduos Sólidos Urbanos. | 33 |
| Figura 12 - Geração Per Capita por Localidade. | 33 |
| Figura 13 - Análise Gravimétrica da Amostra I. | 35 |
| Figura 14 - Segregação do Material em Orgânico e Inorgânico da Amostra I. | 35 |
| Figura 15 - Análise Gravimétrica da Amostra II. | 36 |
| Figura 16 - Segregação do Material em Orgânico, Inorgânico e Rejeitos da Amostra II. | 36 |
| Figura 17 - Análise Gravimétrica da Amostra III. | 37 |
| Figura 18 - Análise Gravimétrica da Média Amostral. | 38 |
| Figura 19 - Geração de energia mensal calculada. | 41 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Quantidade Diária da Destinação de Resíduos Sólidos Domiciliares e/ou Públicos..... | 16 |
| Tabela 2 - Poder Calorífico de alguns Componentes dos RSU..... | 19 |
| Tabela 3 - Cronograma de Coleta dos Resíduos Sólidos Urbanos em Xanxerê - SC. | 23 |
| Tabela 4 - Caracterização Quantitativa dos Resíduos Sólidos de Xanxerê - SC. | 31 |
| Tabela 5 - Geração Per Capita de RSU Para o Município de Xanxerê - SC..... | 32 |
| Tabela 6 - Peso das Amostras Coletadas e Quarteadas. | 34 |
| Tabela 7 - Composição Gravimétrica da Média Amostral. | 37 |
| Tabela 8 - Comparação da Composição Gravimétrica Média de RSU no Brasil e Xanxerê - SC..... | 38 |
| Tabela 9 - Poder Calorífico da Média Amostral da Fração de Materiais Não Combustíveis..... | 39 |
| Tabela 10 - Poder Calorífico da Média Amostral da Fração de Materiais Combustíveis. | 40 |
| Tabela 11 - Quantidade Diária e Mensal da Geração de RSU de Xanxerê - SC. | 40 |
| Tabela 12 - Geração de Energia Diária e Mensal. | 41 |
| Tabela 13 - Dados de Operação da Caldeira e da Turbina. | 42 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 11 |
| 2 OBJETIVOS | 12 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL | 12 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 12 |
| 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 13 |
| 3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS | 13 |
| 3.1.1 Classificação dos Resíduos Sólidos Urbanos | 13 |
| 3.1.2 Geração, Tratamento e Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos | 15 |
| 3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS E MEIO AMBIENTE | 17 |
| 3.3 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS RESÍDUOS SÓLIDOS .. | 18 |
| 4 MATERIAL E MÉTODOS | 21 |
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 21 |
| 4.2 COLETA DE DADOS | 24 |
| 4.2.1 Caracterização Quantitativa dos Resíduos Sólidos Urbanos | 24 |
| 4.2.2 Análise Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos | 25 |
| 4.2.3 Geração Per Capita..... | 27 |
| 4.2.4 Poder Calorífico Médio e Geração de Energia | 28 |
| 4.3 ANÁLISES DOS DADOS | 29 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 31 |
| 5.1 CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS | 31 |
| 5.2 ANÁLISE GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS | 34 |
| 5.3 PODER CALORÍFICO MÉDIO E GERAÇÃO DE ENERGIA..... | 39 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 44 |
| REFERÊNCIAS | 45 |
| APÊNDICE | 49 |

1 INTRODUÇÃO

A produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) aumenta constantemente, este fato ocorre principalmente pelo acelerado processo de urbanização, ligado diretamente ao consumo de produtos (MILANEZ e MASSUKADO, 2012). Essa geração de resíduos na Região Sul que corresponde aos 1.191 municípios, em 2016 foi estimada em 22.581 toneladas/dia de RSU, das quais 95% foram coletadas (ABRELPE, 2016).

Diante disso, surgem inúmeras preocupações relacionadas às questões ambientais e aos aspectos econômicos do Gerenciamento de Resíduos Sólidos, pois a taxa de geração de resíduos sólidos urbanos cresce de forma desproporcional em relação ao tempo de degradação de alguns resíduos e com isso seria necessário áreas cada vez maiores para locação dos aterros sanitários (PEREIRA NETO, 2007).

Além disso, o crescente processo de urbanização demanda de maior produção e consumo de energia elétrica, o que está diretamente ligado ao estilo de vida da população (SLATER, 2002). De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2016), houve um aumento de 12% no consumo de energia elétrica em todos os setores produtivos nos últimos cinco anos.

Neste contexto, sabe-se que a energia elétrica no contexto mundial é predominantemente produzida a partir de combustíveis fósseis, e perante a poluição proveniente da emissão de gases poluentes, há necessidade de fontes alternativas e diversificação na matriz energética (SOARES, 2011). No Brasil, em 2014, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN), a participação de energias renováveis na Matriz Elétrica Brasileira caiu, devido às condições hidrológicas desfavoráveis vivenciadas no país, ou seja, em decorrência da escassez hídrica (EPE, 2015).

Desta forma, surge o aumento na geração térmica, na qual em sua grande maioria é alimentada por combustíveis fósseis, assim a energia gerada a partir dos resíduos sólidos urbanos se apresenta como uma interessante fonte de energia alternativa (TOLMASQUIM, 2003).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar os resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica pelo processo de incineração no município de Xanxerê - SC.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar análise gravimétrica dos resíduos sólidos produzidos no município;
- Quantificar a produção média diária de resíduos sólidos urbanos por habitante;
- Segregar os resíduos sólidos por categoria (combustíveis e não combustíveis);
- Calcular o poder calorífico dos resíduos sólidos, bem como quantificar a geração de energia elétrica e a potência a ser instalada da usina termoelétrica.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Os Resíduos Sólidos Urbanos apresentam uma composição diversificada, devido às características e condições da população geradora (ANDREOLI et al., 2014). Para Pereira Neto (2007), ocorre variações na composição do resíduo sólido seja de uma região para outra, e até mesmo de uma cidade para a outra.

A caracterização dos resíduos sólidos urbanos é de fundamental importância para a determinação do acondicionamento, transporte, tratamento e destinação final (PEREIRA NETO, 2007).

No Brasil os resíduos sólidos seguem aos critérios estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), mais especificamente a NBR 10.004, a qual tem como objetivo principal dispor sobre a classificação dos resíduos sólidos urbanos, e assim define Resíduo Sólido como (ABNT, 2004):

“Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, 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.”

3.1.1 Classificação dos Resíduos Sólidos Urbanos

A classificação dos resíduos sólidos ao considerar uma forma mais prática está relacionada aos riscos potenciais de contaminação ao meio ambiente e também quanto a sua origem (ABNT, 2004). O processo de classificação dos resíduos sólidos quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente é apresentado de forma simplificada na Figura 1.

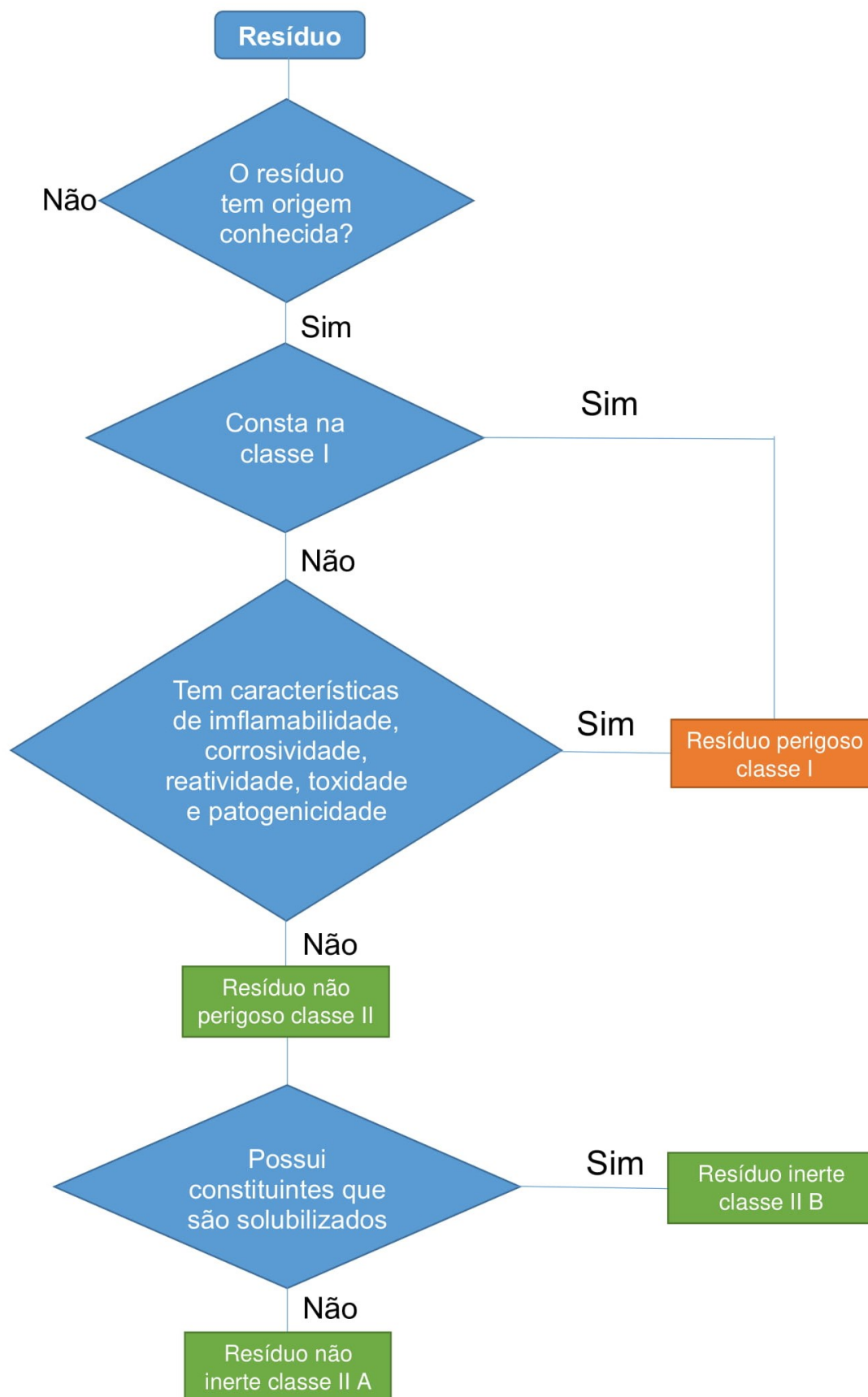


Figura 1 - Classificação dos Resíduos Sólidos.

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Empresas de Resíduos (2006).

De acordo com a NBR 10.004, os resíduos sólidos podem ser classificados da seguinte maneira (ABNT, 2004):

- CLASSE I ou Perigosos: São aqueles que, em função de suas características propriedades físico-químicas ou infectocontagiosas podem apresentar riscos à saúde pública através do aumento da mortalidade ou da incidência de doenças, ou ainda provocar riscos ao meio ambiente quando gerenciado e/ou dispostos de forma inadequada.
- CLASSE II ou Não Perigosos:
 - ✓ CLASSE II A - Não Inertes: São os resíduos que não se enquadram nas classificações de Resíduos Classe I - Perigosos - ou Classe II B - Inertes, de modo que, estes apresentam características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
 - ✓ CLASSE II B - Inertes: São aqueles resíduos que pelas características dos seus constituintes não são solubilizados em água, os quais também não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente.

3.1.2 Geração, Tratamento e Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos

A falta de gerenciamento ou gerenciamento inadequado dos resíduos sólidos urbanos pode resultar em riscos indesejáveis para o meio ambiente e a saúde pública, de modo a desenvolver problemas de cunho social, estético, econômico e administrativo (PEREIRA NETO, 2007). Deste modo, o equacionamento e a solução dos problemas ligados aos RSU estão diretamente ligados com a população, ou seja, ao modo de comportamento de cada indivíduo, ou seja, desde a geração até sua disposição final (PAVAN, 2010).

No Brasil, a coleta regular é utilizada para os resíduos domiciliares e comerciais, de modo que, a coleta é de responsabilidade do município e deve ser bem organizada com o intuito de produzir o maior rendimento, com a importância da participação da população em relação ao acondicionamento destes resíduos (BRASIL, 2007).

A preocupação com o volume de resíduos gerados, assim como a possibilidade de reaproveitamento destes resíduos sólidos, ainda se apresenta em fase inicial (PAVAN, 2010).

No Brasil, a geração total de resíduos sólidos urbanos em 2016 foi de 214.405 toneladas/dia e apresentou uma queda de 2% em relação a 2015, enquanto a geração

per capita de RSU registrou uma queda de aproximadamente 3%, passando de 1,071 kg/hab.dia para 1,040 kg/hab.dia (ABRELPE, 2016).

Quanto a Região Sul, a geração total e per capita dos resíduos sólidos urbanos também apresentou um decréscimo (Figura 2), com geração total em 2016 de 22.127 toneladas/dia e a geração per capita igual a 0,752 kg/hab.dia (ABRELPE, 2016).

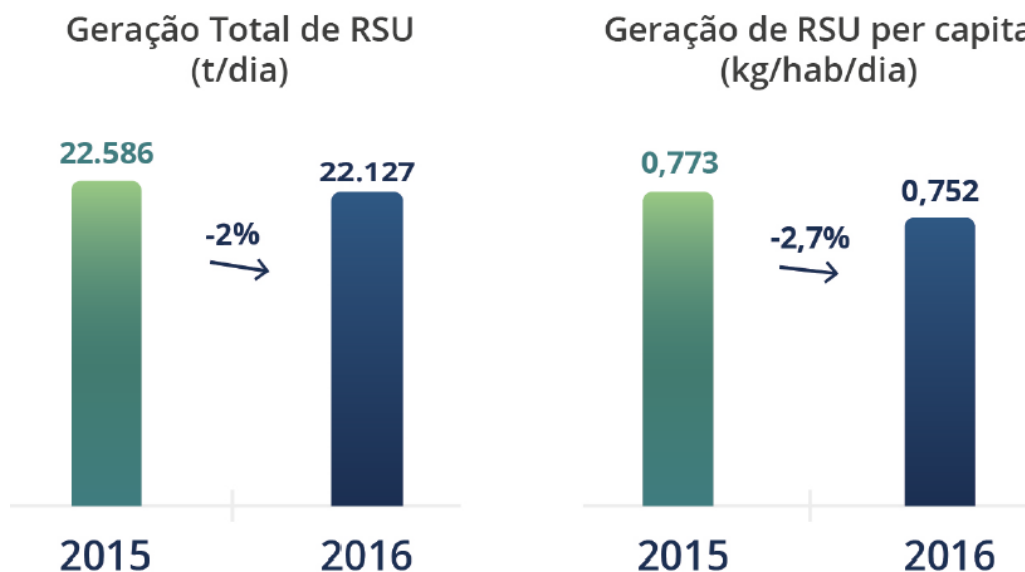


Figura 2 - Geração Total e Per Capita de Resíduos Sólidos Urbanos para a Região Sul.
Fonte: Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2016).

Em relação a disposição final e tratamento dos RSU, existem várias formas de disposição consideradas adequadas do ponto de vista sanitário e ambiental, dentre as quais destacam-se aterros sanitários, aterros controlados, lixão, reciclagem, compostagem e incineração (LIMA, 2004). A Tabela 1 apresenta os valores por região e tipo de destinação dos resíduos sólidos urbanos.

Tabela 1 - Quantidade Diária da Destinação de Resíduos Sólidos Domiciliares e/ou Públicos.

| Destino | Aterro Sanitário | Aterro Controlado | Lixão (t/dia) |
|--------------|------------------|-------------------|---------------|
| Região | (t/dia) | (t/dia) | |
| Norte | 4.429,00 | 3.732,00 | 4.339,00 |
| Nordeste | 15.449,00 | 14.284,00 | 13.622,00 |
| Centro Oeste | 4.845,00 | 7.690,00 | 3.455,00 |
| Sudeste | 74.642,00 | 17.750,00 | 10.228,00 |
| Sul | 14.824,00 | 3.859,00 | 2.304,00 |

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2016).

Na Figura 3 pode ser observada a destinação real dos resíduos sólidos no Brasil, de modo que, o maior percentual é destinado aos aterros sanitários, sendo este valor impulsionado pelas regiões sul e sudeste (ABRELPE, 2016).

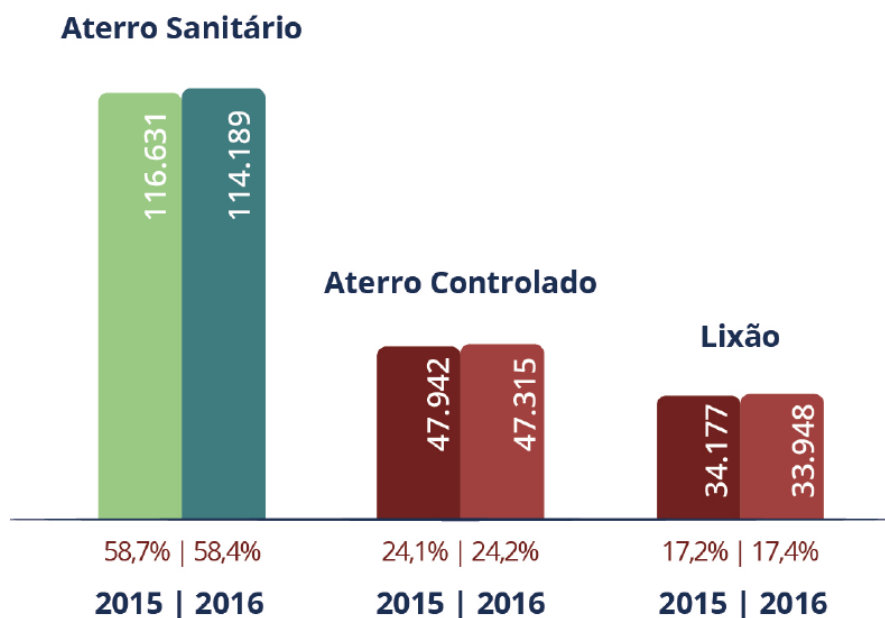


Figura 3 - Disposição Final de RSU no Brasil por Tipo de Destinação (t/dia).
Fonte: Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2016).

3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS E MEIO AMBIENTE

Em relação ao meio ambiente e geração de resíduos sólidos, o maior problema ambiental está relacionado com a poluição local, relacionada diretamente com a área de destinação final, tendo em vista que as regiões vizinhas perdem atratividade principalmente em relação ao uso comercial e residencial (EPE, 2008).

Os principais elementos da poluição local são o mau cheiro, a transmissão de doenças, devido à presença de vetores (ratos, urubus, baratas e entre outros) (PEREIRA NETO, 2007) e potencial de explosões e incêndios (EPE, 2008), os quais estão ligados diretamente às altas concentrações de gás metano nos gases liberados pelos os aterros sanitários (PAVAN 2010).

Os locais de disposição dos RSU são considerados fontes de emissão dos Gases de Efeito Estufa (GEE) como CO₂ (dióxido de carbono) e o CH₄ (gás metano)

(EPE, 2008), presentes em concentrações de 40% e 60%, respectivamente (PAVAN 2010).

Neste sentido, em prol do meio ambiente, surge o aproveitamento energético dos resíduos sólidos, o qual proporciona a substituição da geração de eletricidade proveniente de fontes fósseis, e conseqüentemente reduz e evita a emissão dos gases responsáveis pelo aquecimento global e efeito estufa (EPE, 2008).

3.3 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

A geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos no Brasil, ainda se encontra em fase de estudo e/ou implantação em escala piloto (EPE, 2008). Essa geração de energia ocorre em aterros sanitários a partir da recuperação do metano, dados não apresentados pelo Balanço Energético Nacional (MILANEZ e MASSUKADO, 2012).

Desta maneira, o processo de incineração surge como uma prática viável e inovadora para a geração de energia elétrica a partir da queima de resíduos sólidos urbanos (TOLMASQUIM, 2003). E prática para tratamento de resíduos sólidos no Brasil não é comum, sendo aplicada apenas para resíduos de serviços da saúde e resíduos industriais (PAVAN 2010).

3.3.1 Processo de Incineração (Cogeração)

As usinas que utilizam a incineração (cogeração) de resíduos sólidos urbanos para produzir vapor com a finalidade de gerar energia elétrica, ou empregar em forma de calor em processos industriais são denominadas de Usinas *Waste-to-Energy* (WTE) (SOARES, MIYAMARU e MARTINS, 2017).

A incineração de resíduos sólidos industriais é um processo semelhante as usinas térmicas convencionais, baseadas no ciclo de Rankine, onde a capacidade de geração está diretamente ligada ao poder calorífico do material incinerado (resíduos

sólidos urbanos) e da eficiência da transformação do calor em energia elétrica (EPE, 2008).

O rendimento da geração de energia elétrica de usinas a partir da incineração dos resíduos sólidos urbanos fica entre de 20 e 25%, este fato se dá em decorrência da agressividade dos gases da combustão do lixo (SOARES, MIYAMARU e MARTINS, 2017), devido a caracterização dos resíduos e a presença de diferentes faixas de poder calorífico, assim a temperatura do vapor da caldeira deve ser baixa próxima a 200°C (EPE, 2008).

Na Tabela 2 é apresentado o poder calorífico de alguns materiais normalmente encontrados em resíduos sólidos urbanos.

Tabela 2 - Poder Calorífico de alguns Componentes dos RSU.

| Material | Poder Calorífico (kcal/kg) |
|-----------------|-----------------------------------|
| Plásticos | 6.300 |
| Borracha | 6.780 |
| Couro | 3.630 |
| Têxteis | 3.480 |
| Madeira | 2.520 |
| Alimentos | 1.310 |
| Papel e papelão | 4.030 |

Fonte: Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE) (2008).

A viabilidade de uma usina WTE de resíduos sólidos urbanos está condicionada ao poder calorífico deste combustível empregado. Para a incineração ser considerada viável tecnicamente o poder calorífico inferior (PCI) deve ser maior que 2.000 kcal/kg. Assim, as usinas de incineração podem gerar de 450 a 700 kwh por tonelada de resíduo sólidos urbanos (EPE, 2008).

Ressalta-se que, uma usina convencional moderna de incineração de resíduos sólidos é composta basicamente por um poço de armazenamento do lixo, grelha móvel, câmara de combustão, sistema de descarga das cinzas, sistema de geração de vapor (caldeira), turbinas a gás, condensador, gerador, depurador de gases, filtros e chaminé (Figura 4) (CORSINI, 2013).



Figura 4 - Planta Modelo de Uma Usina Convencional de Incineração de RSU.
Fonte: Corsini (2013).

Nas usinas convencionais de incineração, a geração de energia elétrica ocorre de forma permanente ao longo do dia, a fim de evitar o acúmulo de resíduos sólidos no local. Este tipo de empreendimento permite a redução do volume de resíduos depositados nos aterros sanitários, entre 85 e 90% do volume original. Outra vantagem é que as cinzas geradas durante a incineração podem ser empregadas na produção de cimento (EPE, 2008).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado no aterro sanitário do município de Xanxerê localizado na região oeste do estado de Santa Catarina (Figura 5), que possui área de 377,76 km² (IBGE, 2010) e atualmente conta com uma população estimada de 49.057 habitantes (DATAPEDIA, 2018). O clima do município pela classificação de Koppen e Geiger é do tipo Cfb, ou seja, clima quente e temperado, com temperatura média de 17,3°C e pluviosidade média anual de 2.366 mm (CLIMATE-DATA, 2017).



Figura 5 - Mapa de Localização do Município de Xanxerê - SC.
Fonte: Plataforma Datapedia (2018).

O município de Xanxerê - SC é considerado agrícola, onde sua 70% da sua base econômica concentra-se na agropecuária (MUNICÍPIO DE XANXERÊ, 2013). Ressalta-se que, o município é reconhecido oficialmente como Capital Catarinense do Milho, com produção também de soja e feijão (IBGE, 2010).

4.1.1 Aterro Sanitário Municipal

O aterro sanitário de Xanxerê - SC foi construído no ano de 2010 (Figura 6), conforme os critérios técnicos de engenharia exigidos pela Fundação do Meio Ambiente (FATMA), sendo executado com o objetivo de permitir um confinamento seguro dos resíduos sólidos frente ao controle de proteção ambiental e saúde pública (CONTINENTAL OBRAS, 2017).



Figura 6 - Aterro Sanitário Municipal.
Fonte: Google Earth (2018).

A implantação do aterro compreendeu diversas etapas como elaboração do projeto, licenciamentos ambientais, limpeza do terreno, terraplanagem, escavação, impermeabilização do solo, sistema de drenagem e obras de construção civil. A operação compreende além da disposição dos resíduos sólidos, o monitoramento das águas residuais e do sistema de tratamento de líquidos percolados (CONTINENTAL OBRAS, 2017).

O aterro sanitário possui uma área de 14,52 hectares com capacidade para atender 18 municípios para a coleta seletiva de resíduos sólidos domiciliares. Dentre

os municípios se destacam Abelardo Luz, Bom Jesus, Cordilheira Alta, Coronel Freitas, Coronel Martins, Entre Rios, Formosa do Sul, Ipuauçu, Irati, Jardinópolis, Lajeado Grande, Marema, Ouro Verde, Quilombo, Santiago do Sul, São Domingos, União do Oeste e Xanxerê. Portanto, o aterro sanitário recebe diariamente em média 42,70 toneladas, sendo 69% proveniente do município de Xanxerê - SC (CONTINENTAL OBRAS, 2017).

No município de Xanxerê - SC a coleta dos resíduos sólidos urbanos ocorre todos os dias da semana (segunda a sábado) e atende 28 bairros e o centro da cidade. Durante o dia, os caminhões realizam a coleta de resíduos nos bairros da cidade e a noite na região central. A Tabela 3 apresenta o cronograma da coleta de resíduos sólidos em Xanxerê - SC (CONTINENTAL OBRAS, 2017).

Tabela 3 - Cronograma de Coleta dos Resíduos Sólidos Urbanos em Xanxerê - SC.

| Cronograma | Localidade | |
|----------------------|---|---------------------------|
| | Dia | Noite |
| Segunda Feira | Vista Alegre, São Romeiro, Sufiatti, Monte Castelo, Santos Dias e Santa Cruz; Aparecida, Nossa Senhora de Fatima, São Pedro, Jardim Tarumã, Vila Sésamo e Pinheiro. | Centro, La Salle, Veneza. |
| Terça Feira | Colatto, Castelo Branco, Tonial, Joao Winckler, Maria Winckler e Frederico Ferronato; Pinheiros, Tacca, Nossa Senhora de Lurdes, Bortolon, Leandro, dos Esportes e São Jorge. | Centro. |
| Quarta Feira | Vista Alegre, São Romeiro, Sufiatti, Monte Castelo, Santos Dias e Santa Cruz | Centro, La Salle, Veneza. |
| Quinta Feira | Colatto, Castelo Branco, Tonial, Joao Winckler, Maria Winckler e Frederico Ferronato; Pinheiros, Tacca, Nossa Senhora de Lurdes, Bortolon, Leandro, dos Esportes e São Jorge. | Centro. |
| Sexta Feira | Vista Alegre, São Romeiro, Sufiatti, Monte Castelo, Santos Dias e Santa Cruz; Aparecida, Nossa Senhora de Fatima, São Pedro, Jardim Tarumã, Vila Sésamo e Pinheiro. | Centro, La Salle, Veneza. |
| Sábado | Centro, La Salle, Veneza. | |

Fonte: Adaptado de Continental Obras e Serviços (2018).

4.2 COLETA DE DADOS

4.2.1 Caracterização Quantitativa dos Resíduos Sólidos Urbanos

A caracterização quantitativa dos resíduos sólidos gerados no município foi realizada por meio de entrevista (Apêndice A) com o responsável técnico pelo aterro sanitário municipal, contatado pela empresa responsável pela coleta seletiva, Continental Obras e Serviços, durante os meses de agosto de 2017 a janeiro de 2018.

Para quantificar a massa de resíduos sólidos foi realizada a pesagem dos caminhões coletores vazios (antes da coleta) e dos caminhões coletores (Figura 7 A), após a coleta do RSU com o auxílio da balança existente no aterro municipal (Figura 7 B), e a partir da diferença das pesagens se obteve a quantidade de resíduos sólidos urbanos diários gerados no município de Xanxerê-SC.



Figura 7 - A) Caminhão Coletor; B) Resíduos Sólidos Urbanos.
Fonte: Adaptado de Continental Obras e Serviços (2017).

Essa pesagem foi realizada pelo responsável técnico do aterro municipal diariamente nos horários das 15:00h e das 21:00h, e a partir destes dados foi realizado a soma e quantificado a massa mensal de RSU no período de agosto de 2017 a janeiro de 2018.

4.2.2 Análise Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos

A análise gravimétrica é um método que determina os tipos de resíduos sólidos urbanos coletados que compõem o aterro sanitário, a partir da separação dos resíduos secos e úmidos (ABNT, 2004).

Para a caracterização gravimétrica se baseou na norma da ABNT, a NBR 10.007/2004 que especifica a amostragem de resíduos sólidos, fundamentado pela técnica de quarteamento. Essa técnica é um processo de divisão da amostra pré-homogeneizada em (4) quatro partes iguais, sendo selecionas (2) duas partes opostas entre si, a fim de constituir uma nova amostra e as partes restantes são descartadas. As duas partes não descartadas são misturadas na sua totalidade e o processo de quarteamento é repetido até que se obtenha o volume desejado (Figura 8) (ABNT, 2004).

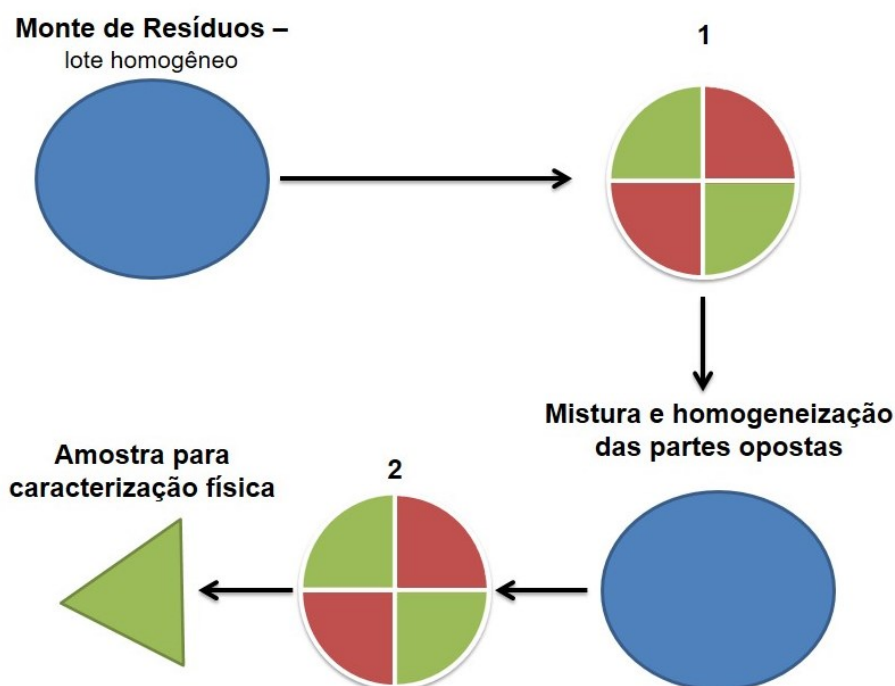


Figura 8 - Método do Quarteamento.
Fonte: Adaptado de Rikils et al. (2016).

Ainda de acordo com a ABNT - NBR 10.007/2004, a caracterização gravimétrica ou caracterização qualitativa, é a determinação dos constituintes e de

suas respectivas percentagens em peso e volume, em uma amostra de resíduos sólidos, que pode ser físico, químico e biológico (ABNT, 2004).

A composição gravimétrica constituiu uma informação importante na compreensão do comportamento dos resíduos, e expressa, em percentual, a presença de cada componente, em relação ao peso total da amostra dos resíduos (RIKILS et al., 2016).

Para tanto, foram realizadas visitas técnicas no aterro municipal para conhecer os equipamentos e procedimentos adotados. A metodologia adotada para avaliar as quantidades específicas de cada tipo de resíduo sólido foi pela caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos pelo método de quarteamento.

O processo de amostragem foi desenvolvido em triplicata durante o mês de janeiro de 2018. Neste caso, as amostras foram coletadas conforme o acondicionamento dos resíduos urbanos, ou seja, se fez o uso da técnica de amostragem em montes ou pilhas de resíduos e para a composição das amostras se fez a coleta em três seções (no topo, no meio e na base).

As amostras coletadas e homogêneas foram destinadas à etapa de quarteamento (Figura 9), ou seja, a amostra foi dividida em quatro partes iguais, sendo que as duas partes diagonais foram descartadas, e as outras duas partes foram selecionadas e acondicionadas em um recipiente para pesagem.



Figura 9 - Técnica do Quarteamento.
Fonte: Autoria Própria (2018).

Posteriormente a etapa do quarteamento se realizou a triagem da amostra e a segregação dos resíduos sólidos urbanos. Neste processo de segregação, os resíduos sólidos foram divididos em matéria orgânica; papel e papelão; plásticos; vidro; borracha; metais; e rejeitos (tecidos, couro, madeira e isopor).

Após a separação dos resíduos sólidos foi realizada a pesagem de cada fração e para se calcular a porcentagem de cada material em relação ao peso total da amostra selecionada.

4.2.3 Geração Per Capita

Para calcular a geração de resíduos sólidos urbanos per capita se considerou a população amostral, ou seja, a população atingida pela coleta de RSU no município de Xanxerê - SC, especificamente na área urbana sendo esta de 39.142 habitantes. Primeiramente se calculou a média de resíduos gerados durante os (6) seis meses da pesquisa (agosto de 2017 a janeiro de 2018), conforme apresenta a Equação (1).

$$RSU_{\text{méd.}} = \frac{m1 + m2 + m3 + m4 + m5 + m6}{n^{\circ} \text{ de observações}} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

- ✓ $RSU_{\text{méd.}}$ = Média de resíduos sólidos urbanos coletados no município (kg);
- ✓ m_n = Massa de RSU coletados em cada mês do estudo (kg);
- ✓ n° de observações = 6 observações (de agosto de 2017 a janeiro de 2018).

Posteriormente com a média de resíduos sólidos urbanos, através da Equação (2) se calculou a geração de resíduos per capita.

$$RSU_{\text{per cap.}} = \frac{RSU_{\text{méd.}}}{\text{população amostral} \times 30} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

- ✓ $RSU_{per\ cap.}$ = Resíduos sólidos urbanos gerados (kg/dia.pessoa);
- ✓ $RSU_{méd.}$ = Média de resíduos sólidos urbanos coletados no município (kg/mês);
- ✓ População amostral = População atingida pela coleta (população urbana);
- ✓ O valor 30 é o número admissional referente a média de dias do mês.

4.2.4 Poder Calorífico Médio e Geração de Energia

O poder calorífico de um determinado material combustível é definido pelo seu conteúdo energético, ou seja, pela energia liberada quando o material é queimado na presença de oxigênio (comburente) e na presença de calor (MARAFFON et al., 2016).

O Poder Calorífico Superior (PCS) se refere a quantidade de calorias liberadas na sua combustão completa, expresso em quilocaloria/quilograma (kcal/kg), enquanto o Poder Calorífico Inferior (PCI) é o valor do poder calorífico superior, subtraindo-se a quantidade de água presente no combustível (umidade), ou seja, é um poder calorífico real de um combustível (LIMA, 2004).

No cálculo do poder calorífico baseou-se no PCI dos materiais encontrados por meio da literatura, onde o PCI do resíduo sólido do município de Xanxerê - SC foi definido pelas frações de composição do material, sendo definida pela Equação (3).

$$PCI = PCI_{plástico} \times \%plástico + PCI_{papel|papelão} \times \%papel|papelão + PCI_{borracha} \times \%borracha + PCI_{M.O} \times \%M.O \quad Eq. 3$$

Onde:

- ✓ PCI = Poder Calorífico Inferior (kcal/kg);
- ✓ % = Percentual de cada Material que compõem a Amostra;
- ✓ M.O. = Matéria Orgânica.

Posteriormente ao cálculo do poder calorífico, se avaliou o valor obtido com o objetivo de calcular a geração de energia elétrica pelo resíduo sólido disposto no aterro sanitário municipal. De acordo com Sores, Miyamaru e Martins (2017), a geração de energia elétrica pode variar de 450 a 700 kwh/tonelada perante o poder calorífico do resíduo sólido. Assim calculou-se pela Equação (4), a geração de energia mensal.

$$EMG = EG \times mRSU \text{ Eq. 4}$$

Onde:

- ✓ EMG = Energia Mensal Gerada (kwh/mês);
- ✓ EG = Energia Gerada (kwh, número admissional, conforme o poder calorífico médio do RSU);
- ✓ mRSU = Massa de Resíduos Sólidos Urbanos (toneladas/mês).

4.3 ANÁLISES DOS DADOS

Mediante aos dados primários obtidos por entrevista e visita a campo no aterro sanitário municipal; e os dados secundários retirados da literatura foi possível analisar estes com o auxílio de um programa computacional (Excel). Os dados sobre a geração per capita, a massa total de resíduos sólidos urbanos diários e mensais, a caracterização amostral e o poder calorífico para a geração de energia elétrica para o município de Xanxerê - SC foram dispostos em tabelas e gráficos.

Ressalta-se que para a análise gravimétrica se fez o uso da estatística pela média, de modo que esta análise foi realizada em triplicata e para verificar se havia diferença significativa entre as frações de resíduos sólidos segregados em cada amostra, os resultados foram analisados de forma individual e conjunta para comparação.

Os dados de poder calorífico foram analisados através da média ponderada, onde se considerou os dados de literatura sobre o poder calorífico para cada resíduo sólido e também a fração de cada RSU obtido pela média amostral. Em referência a

geração de energia elétrica, o valor foi obtido pela literatura, na qual a geração de energia total foi calculada, a partir do uso da média diária de resíduos sólidos urbanos coletados e o número de dias do mês com o auxílio do programa Excel.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

De acordo com o levantamento realizado junto à equipe técnica do aterro sanitário, a coleta de resíduos sólidos apresenta uma média de 35 toneladas diárias e 900,10 toneladas mensal (Tabela 4).

Tabela 4 - Caracterização Quantitativa dos Resíduos Sólidos de Xanxerê - SC.

| Mês/Ano | Quantidade de RSU (kg) | Quantidade de RSU (ton) |
|--------------|------------------------|-------------------------|
| Agosto/17 | 870.600,00 | 870,60 |
| Setembro/17 | 992.600,00 | 992,60 |
| Outubro/17 | 993.300,00 | 993,30 |
| Novembro/17 | 794.700,00 | 794,70 |
| Dezembro/17 | 795.200,00 | 795,20 |
| Janeiro/18 | 954.200,00 | 954,20 |
| Total | 5.400.600,00 | 5.400,60 |
| Média | 900.100,00 | 900,10 |

Fonte: Autoria Própria (2018).

No aterro sanitário os resíduos são dispostos em pilhas e nivelados com um trator de esteira, quando os RSU's atingem uma altura de aproximadamente 4 metros, estes são cobertos por uma camada de terra com 0,60 metros. Devido, ao processo de degradação dos resíduos ocorre a formação de gases, especificamente metano (CH₄) e dióxido de carbono, os quais são drenados por um dreno de gás e queimados a céu aberto. Além da formação de gases, ocorre também a produção de chorume que é drenado e encaminhado até as lagoas de tratamento.

A Figura 10 demonstra a quantidade de resíduos sólidos urbanos coletados e acondicionados no aterro sanitário de agosto de 2017 a janeiro de 2018, totalizando neste período 5.400, 60 toneladas.

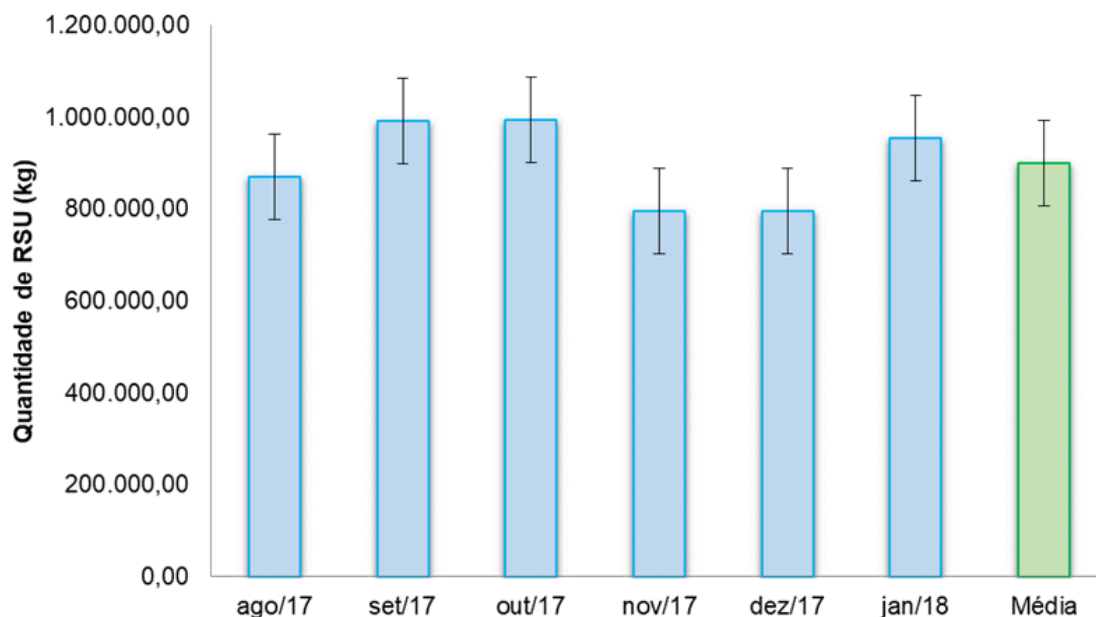


Figura 10 - Caracterização Quantitativa dos Resíduos Sólidos Urbanos Mensais.
Fonte: Autoria Própria (2018).

Com base nos dados de quantidade de resíduos sólidos urbanos que chegam ao aterro sanitário municipal, é possível afirmar que a geração *per capita* de RSU para o município de Xanxerê - SC é em média de 0,77 kg/hab.dia (Tabela 5), levando em conta somente a população da zona urbana.

Tabela 5 - Geração Per Capita de RSU Para o Município de Xanxerê - SC.

| Mês/Ano | Quantidade de RSU (kg/hab.dia) |
|--------------|--------------------------------|
| Agosto/17 | 0,74 |
| Setembro/17 | 0,85 |
| Outubro/17 | 0,85 |
| Novembro/17 | 0,68 |
| Dezembro/17 | 0,68 |
| Janeiro/18 | 0,81 |
| Média | 0,77 |

Fonte: Autoria Própria (2018).

A geração per capita apresentou uma variação durante o período de estudo (agosto de 2017 a janeiro de 2018) de 0,68 a 0,85 kg/hab.dia, conforme demonstra a Figura 11.

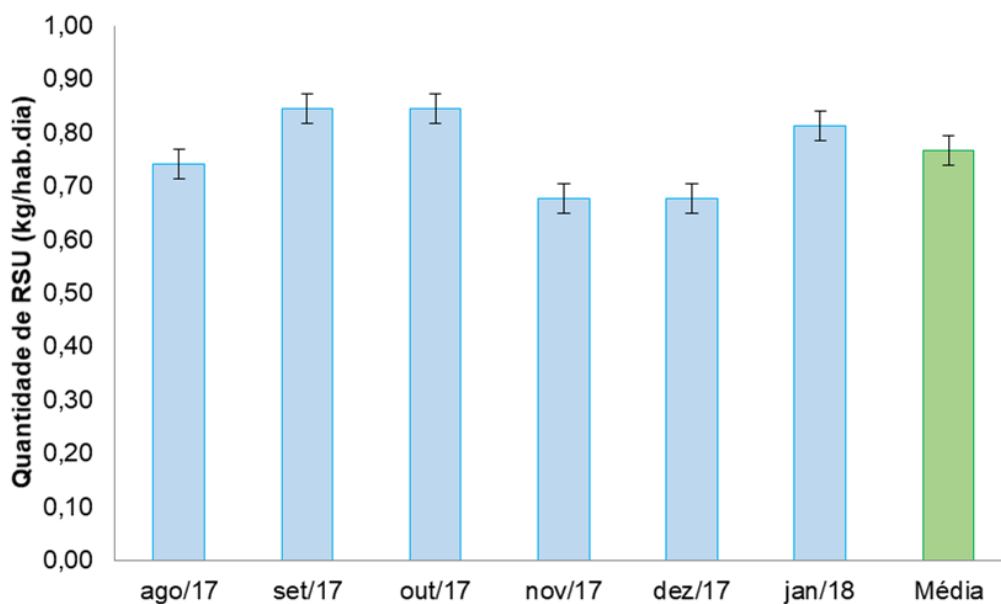


Figura 11 - Geração Per Capita de Resíduos Sólidos Urbanos.
Fonte: Autoria Própria (2018).

Conforme a Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) (2016), a geração per capita de resíduos sólidos urbanos a nível de Brasil é em média 1,04 kg/hab.dia e para região sul é de 0,752 kg/hab.dia. Enquanto que para o estado de Santa Catarina, a geração per capita fica em torno de 0,693 kg/hab.dia, como mostra a Figura 12 (ABRELPE, 2014).

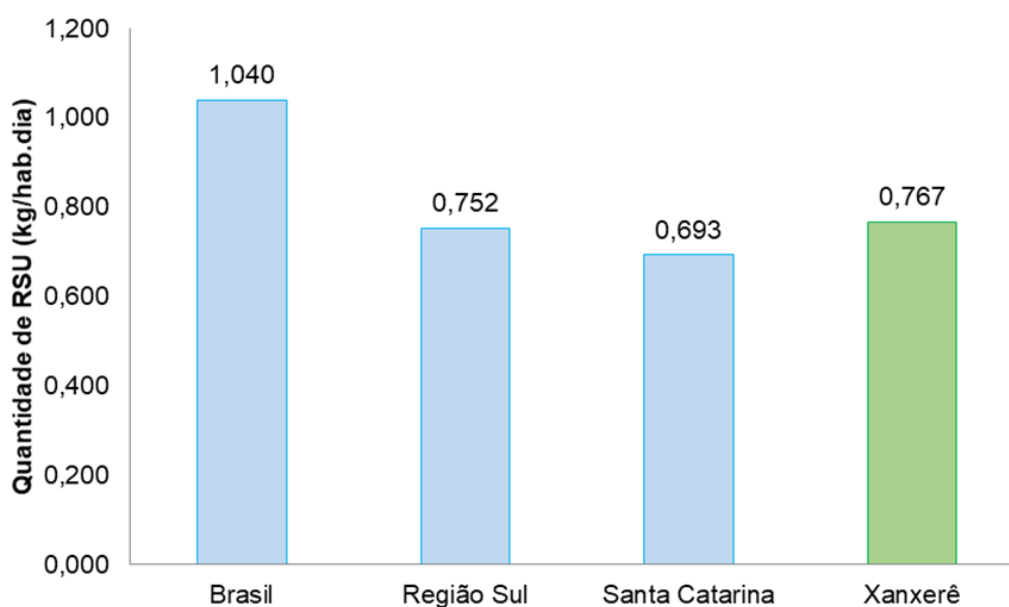


Figura 12 - Geração Per Capita por Localidade.
Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2014-2016).

De acordo com a Figura 12 é possível notar que a geração per capita de resíduos sólidos urbanos para o município de Xanxerê - SC de 0,767 kg/hab.dia se aproxima com a média de 0,752 kg/hab.dia referente a Região Sul, e apresenta uma leve variação se comparada à média estadual de 0,693 kg/hab.dia.

5.2 ANÁLISE GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A análise gravimétrica foi realizada no mês de janeiro de 2018 pelo método do quarteamento e a quantidade de cada amostra coletada antes e após o quarteamento é exposta na Tabela 6.

Tabela 6 - Peso das Amostras Coletadas e Quarteadas.

| Amostragem | Massa Coletada (kg) | Massa obtida após Quarteamento (kg) |
|-------------------|----------------------------|--|
| Amostra I | 10,20 | 5,40 |
| Amostra II | 10,70 | 5,90 |
| Amostra III | 10,30 | 5,60 |
| Média | 10,40 | 5,63 |

Fonte: Autoria Própria (2018).

A seguir serão apresentados de forma separada os resultados da análise gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos de cada amostra do município de Xanxerê - SC.

A Figura 13 demonstra a análise gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos da amostra I com uma representatividade da massa total quarteada de 5,40 kg, tendo 3,00 kg de matéria orgânica; 1,40 kg referente a papel e papelão; 0,50 kg de plásticos; 0,46 kg de vidros e 0,04 kg de metais.

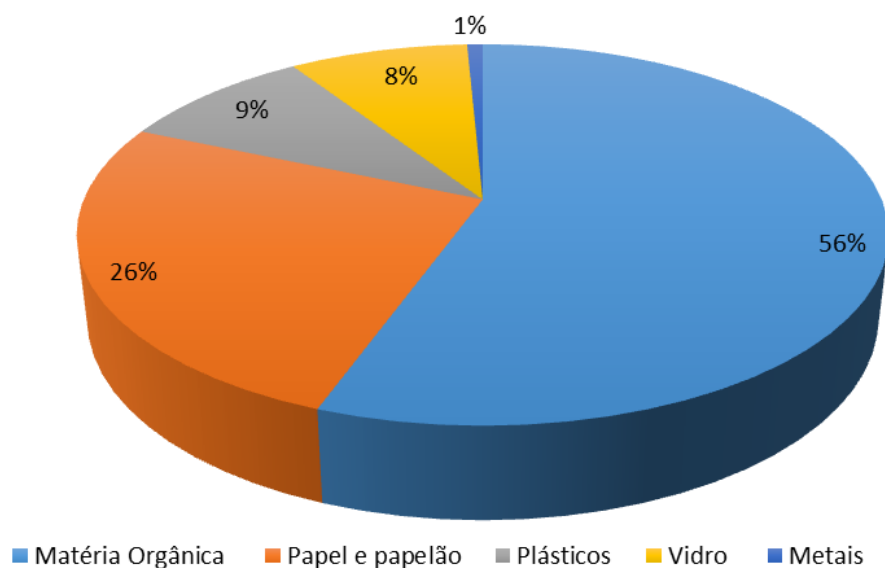


Figura 13 - Análise Gravimétrica da Amostra I.
Fonte: Autoria Própria (2018).

Observa-se que da Amostra I, o maior percentual de material é orgânico com 91% referente a papel, papelão, plástico e matéria orgânica (combustível) referente a material combustível e 9% de material inorgânico (não combustível) como vidro e metais (Figura 14).

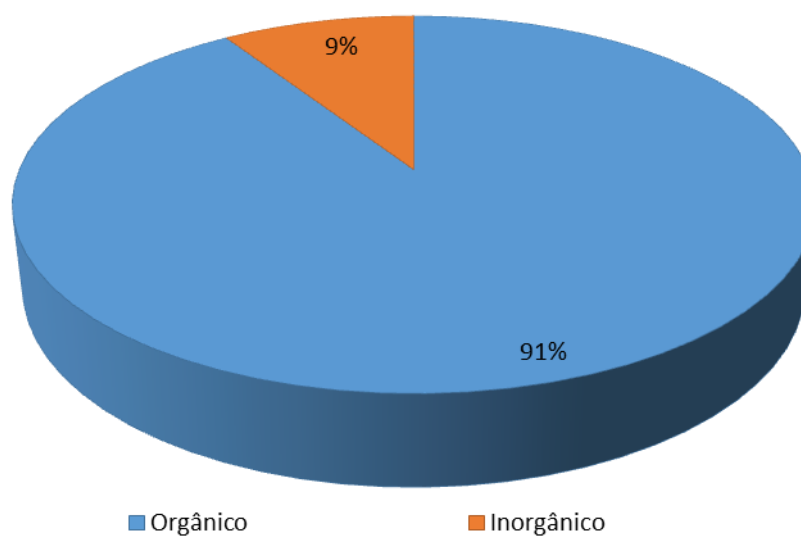


Figura 14 - Segregação do Material em Orgânico e Inorgânico da Amostra I.
Fonte: Autoria Própria (2018).

A análise gravimétrica da Amostra II apresentou 5,90 kg de massa total quarteada, onde 4,20 kg foi de matéria orgânica; 0,53 kg de papel e papelão; 0,37 kg de plásticos; 0,50 kg de vidros; 0,13 kg de borracha; 0,12 kg referente a metais e 0,05 kg de rejeitos (tecidos, couro, madeira e isopor) (Figura 15).

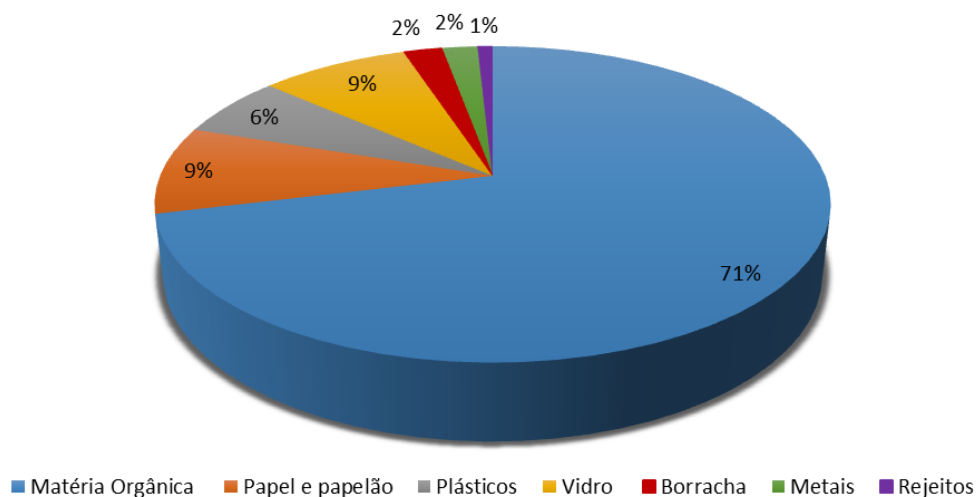


Figura 15 - Análise Gravimétrica da Amostra II.
Fonte: Autoria Própria (2018).

Conforme a análise da Amostra II (Figura 16), 89% é material orgânico (papel, papelão, plástico e matéria orgânica) caracterizado como combustível, 10% representa o material inorgânico (não combustível) e 1% a rejeitos.

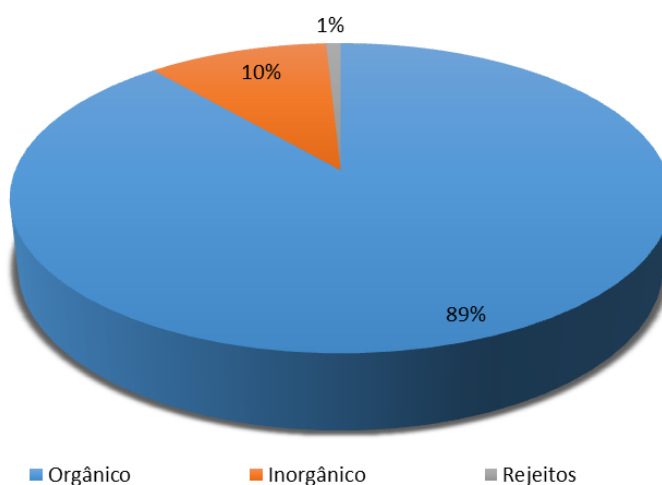


Figura 16 - Segregação do Material em Orgânico, Inorgânico e Rejeitos da Amostra II.
Fonte: Autoria Própria (2018).

A análise gravimétrica da Amostra III pode ser observada na Figura 17 com massa total quarteada de 5,60 kg, composta por 4,00 kg de matéria orgânica; 1,00 kg de papel e papelão e 0,60 kg de plásticos. Portanto, esta amostra é composta totalmente por material orgânico, ou seja, materiais combustíveis.

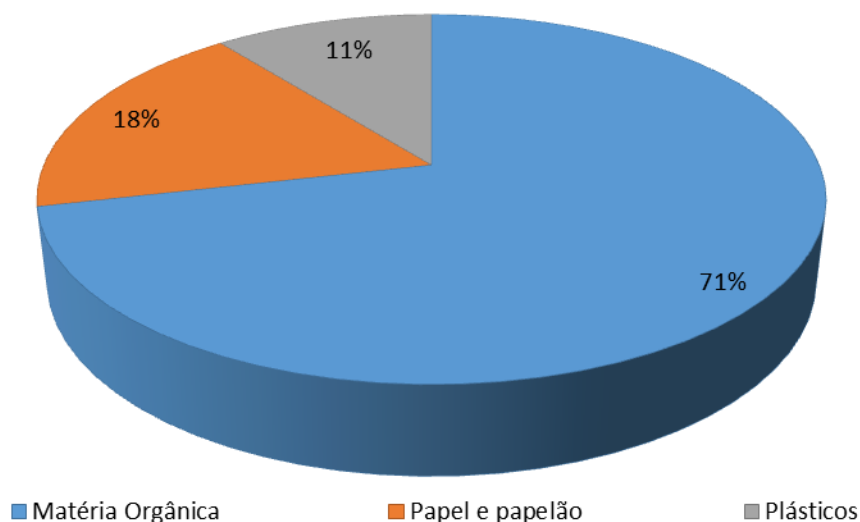


Figura 17 - Análise Gravimétrica da Amostra III.
Fonte: Autoria Própria (2018).

Mediante as três amostras analisadas se obteve a caracterização dos resíduos sólidos dispostos no aterro sanitário, por meio da composição gravimétrica da média amostral, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Composição Gravimétrica da Média Amostral.

| Material | Massa (kg) | Percentual (%) |
|------------------|-------------|----------------|
| Matéria Orgânica | 3,73 | 66,29% |
| Papel e papelão | 0,98 | 17,34% |
| Plásticos | 0,49 | 8,70% |
| Vidro | 0,32 | 5,68% |
| Borracha | 0,04 | 0,76% |
| Metais | 0,05 | 0,94% |
| Rejeitos | 0,02 | 0,28% |
| Total | 5,63 | 100,00% |

Fonte: Autoria Própria (2018).

O percentual de material reciclável foi de 32,66% composto por papel, papelão, plásticos, vidros e metais (Figura 18), em virtude da coleta seletiva que é realizada no município.

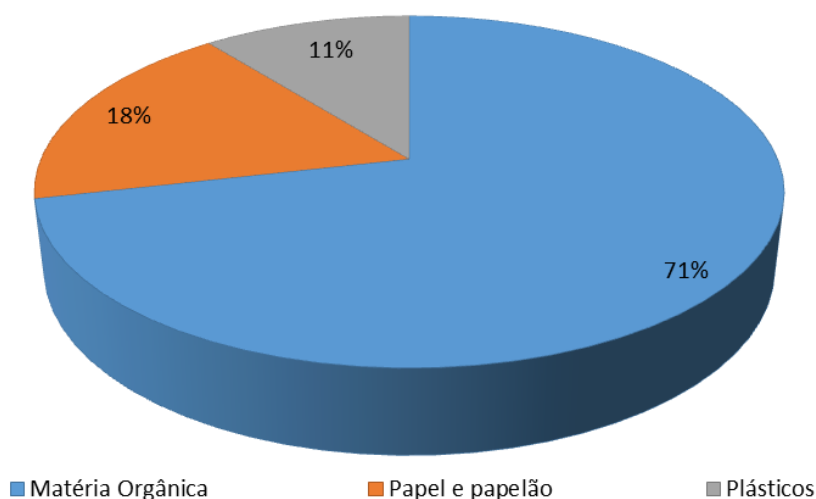


Figura 18 - Análise Gravimétrica da Média Amostral.
Fonte: Autoria Própria (2018).

A análise gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos para o município de Xanxerê - SC foi comparada com a composição média dos RSU's no Brasil (Tabela 8).

Tabela 8 - Comparação da Composição Gravimétrica Média de RSU no Brasil e Xanxerê - SC.

| Tipo de Material | Brasil (%) | Xanxerê - SC (%) |
|------------------|----------------|------------------|
| Matéria Orgânica | 64,00% | 66,29% |
| Papel e papelão | 13,50% | 17,34% |
| Plásticos | 4,70% | 8,70% |
| Vidros | 1,50% | 5,68% |
| Metais | 1,50% | 0,94% |
| Outros Materiais | 14,80% | 1,05% |
| Total | 100,00% | 100,00% |

Fonte: Adaptado de Pereira Neto (2007).

5.3 PODER CALORÍFICO MÉDIO E GERAÇÃO DE ENERGIA

O resultado do poder calorífico se obteve através de modelo matemático disposto na metodologia, sendo que para o cálculo se considerou a análise gravimétrica média dos resíduos sólidos urbanos do município de Xanxerê - SC.

Além disso, foi necessário identificar o resíduo sólido por categoria como combustíveis (papel, papelão, plástico e matéria orgânica) e não combustíveis (vidros e metais), de modo que, o cálculo foi realizado conforme a Equação 3 apresentada na metodologia considerando o poder calorífico teórico (Tabela 9 e Tabela 10).

Tabela 9 - Poder Calorífico da Média Amostral da Fração de Materiais Não Combustíveis.

| Material | Poder Calorífico Teórico (kcal/kg) (EPE, 2008) | Massa (kg) | Percentual (%) | Poder Calorífico Calculado (kcal/kg) |
|-------------------------------------|---|-------------------|-----------------------|---|
| Matéria Orgânica | 1.310,00 | 3,73 | 62,85% | 823,34 |
| Papel e papelão | 4.030,00 | 0,98 | 16,44% | 662,62 |
| Plásticos | 6.300,00 | 0,49 | 8,25% | 519,70 |
| Vidro | * | 0,48 | 8,08% | * |
| Borracha | 6.780,00 | 0,13 | 2,19% | 148,38 |
| Metais | * | 0,08 | 1,35% | * |
| Rejeitos (couro, madeira e têxteis) | 3.210,00 | 0,05 | 0,84% | 27,02 |
| Total | | 5,94 | 100% | 2.181,07 |

Nota: *resíduos sólidos urbanos não combustíveis (inorgânicos), ou seja, sem poder calorífico.

Fonte: **Autoria Própria (2018).**

O poder calorífico médio obtido pelo método matemático foi de 2.408,09 kcal/kg, valor este próximo a lenha que com 40% de umidade apresenta um poder calorífico de 2.400,00 kcal/kg (ARAUTERM, 2018). Contudo, para um poder calorífico calculado mais preciso se faz necessário uma análise elementar do composto (resíduo sólido urbano) e/ou a queima direta em um equipamento de calorímetro.

Tabela 10 - Poder Calorífico da Média Amostral da Fração de Materiais Combustíveis.

| Material | Poder Calorífico Teórico (kcal/kg) (EPE, 2008) | Massa (kg) | Percentual (%) | Poder Calorífico Calculado (kcal/kg) |
|-------------------------------------|---|-------------------|-----------------------|---|
| Matéria Orgânica | 1.310,00 | 3,73 | 69,39% | 909,05 |
| Papel e papelão | 4.030,00 | 0,98 | 18,15% | 731,59 |
| Plásticos | 6.300,00 | 0,49 | 9,11% | 573,79 |
| Borracha | 6.780,00 | 0,13 | 2,42% | 163,83 |
| Rejeitos (couro, madeira e têxteis) | 3.210,00 | 0,05 | 0,93% | 29,83 |
| Total | | 5,38 | 100% | 2.408,09 |

Fonte: Autoria Própria (2018).

A partir da média do poder calorífico obtido no trabalho se calculou a geração de energia média se adotando 450 kWh/tonelada de RSU (SOARES, MIYAMARU e MARTINS, 2017). Ressalta-se que, o baixo potencial de geração adotado no cálculo de geração se dá pela amostra apresentar um poder calorífico não tão alto quando comparado com outros combustíveis.

Em referência a quantidade de resíduos sólidos urbanos diários para a incineração e para a estimativa da geração de energia se desconsiderou o percentual de 9,43%, referente aos materiais não combustíveis (metais e vidros) (Tabela 11), pois estes tipos de materiais não apresentam poder calorífico.

Tabela 11 - Quantidade Diária e Mensal da Geração de RSU de Xanxerê - SC.

| Mês/Ano | Quantidade de RSU (ton/mês) | Quantidade de RSU (ton/dia) | Quantidade de RSU* (ton/dia) |
|----------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Agosto/17 | 870,60 | 28,08 | 25,44 |
| Setembro/17 | 992,60 | 33,09 | 29,98 |
| Outubro/17 | 993,30 | 32,04 | 29,03 |
| Novembro/17 | 794,70 | 26,49 | 24,00 |
| Dezembro/17 | 795,20 | 25,65 | 23,24 |
| Janeiro/18 | 954,20 | 30,78 | 27,89 |
| Média | 900,10 | 29,36 | 26,60 |

Nota: *Quantidade de RSU's desconsiderando os materiais não combustíveis.

Fonte: Autoria Própria (2018).

Com a massa de resíduos sólidos combustíveis diário se calculou a energia diária e posteriormente a energia mensal, conforme as equações abaixo, de modo que, os dados obtidos se encontram na Tabela 12 e Figura 19.

Tabela 12 - Geração de Energia Diária e Mensal.

| Mês/Ano | Quantidade de RSU (ton/dia) | Energia Diária Gerada (kWh/dia) | Energia Mensal Gerada (kWh/mês) |
|--------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Agosto/17 | 25,44 | 11.449,79 | 354.943,62 |
| Setembro/17 | 29,98 | 13.489,43 | 404.683,02 |
| Outubro/17 | 29,03 | 13.063,50 | 404.968,41 |
| Novembro/17 | 24,00 | 10.799,97 | 323.999,19 |
| Dezembro/17 | 23,24 | 10.458,16 | 324.203,04 |
| Janeiro/18 | 27,89 | 12.549,27 | 389.027,34 |
| Média | 26,60 | 11.968,35 | 366.970,77 |

Fonte: Autoria Própria (2018).

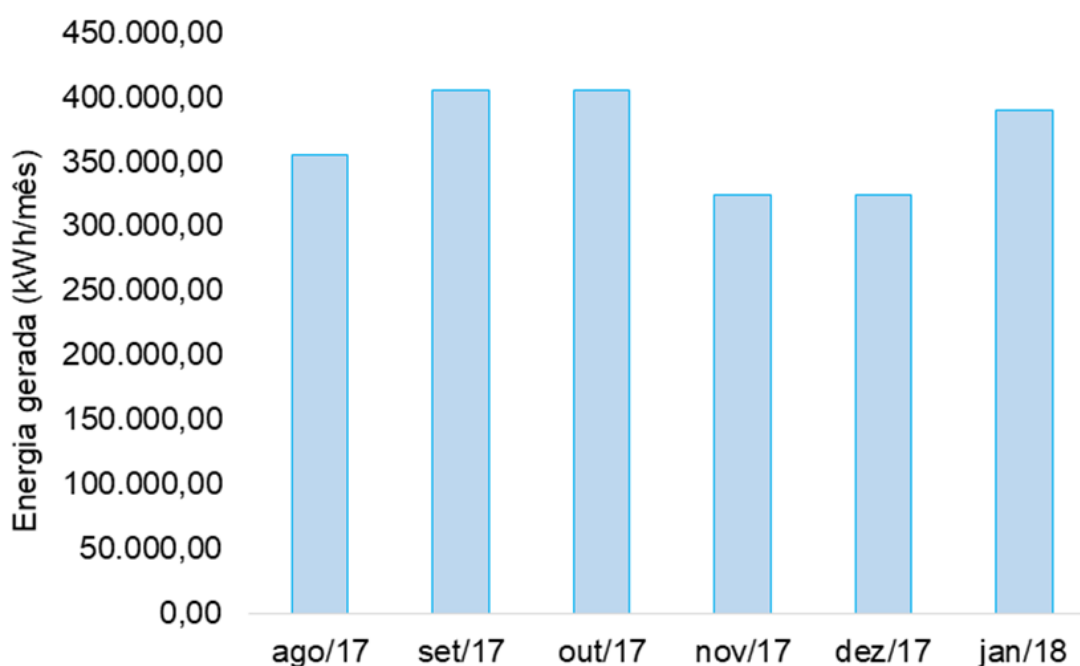


Figura 19 - Geração de energia mensal calculada.

Fonte: Autoria Própria (2018).

De acordo com Fredigo, Gonçalves e Lucas (2009), o consumo residencial de energia elétrica na Região Sul é em média 273,10 kwh/mês no período de verão e

261,30 kwh/mês nos meses de inverno, assim com a energia média gerada de 366.970,77 kwh/mês será possível atender 1.373 residências.

Através da geração de energia calculada e da experiência profissional foi possível determinar a potência instalada, sendo esta de 1MW. De modo que, a incineração dos RSU's ocorrerão diretamente na fornalha de uma caldeira com a finalidade de aquecer a água e gerar vapor, de modo que, o vapor gerado movimentará uma turbina acoplada ao gerador, sendo assim a energia térmica é convertida em energia cinética e posteriormente em energia elétrica.

Com o sistema e a potência a ser instalada definida buscou-se dados juntos a fabricantes de caldeiras e turbina a vapor, tendo em vista que para a potência instalada serão necessários 6 toneladas de vapor por hora (Tabela 13).

Tabela 13 - Dados de Operação da Caldeira e da Turbina.

| Dados Caldeira - Turbina | |
|--|----------|
| Condições de trabalho da caldeira - turbina | |
| Pressão de entrada | 25 Bar |
| Pressão de saída | 0,12 Bar |
| Temperatura de entrada | 380°C |
| Vazão mássica de vapor | 6 ton/h |
| Quantidade de calor liberado na caldeira (kcal/kg) | 4.980,00 |
| Outros valores a considerar | |
| Rendimento do redutor | 0,98 |
| Rendimento do gerador | 0,95 |
| Rendimento da caldeira | 0,88 |

Fonte: Solidda Energia (2018).

Com os dados de operação e a quantidade de calor necessário na caldeira pela queima do combustível, é possível determinar o consumo deste na fornalha da caldeira, por meio da Equação (5).

$$q_{cald} = m_{comb} \times PCI_{comb} \times n_{cald} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

m_{comb} = Vazão Mássica de Combustível (kg/s);

PCI_{comb} = Poder Calorífico do Combustível (KJ/kg);

η_{cald} = Eficiência da Caldeira;

q_{cald} = Calor na caldeira (KJ/kg).

$$4980,00 = m_{comb} \times 10.075,45 \times 0,88$$

$$m_{comb} = 0,56 \text{ kg/s}$$

$$\mathbf{m_{comb} = 2,022, ton/h}$$

Com o poder calorífico médio calculado de 2.408,09 kcal/kg (10.075,45 KJ/kg) e a quantidade de calor na caldeira empregada ao sistema será necessário uma massa de combustível de 2,022 ton/h, com a quantidade média de RSU's combustíveis diária de 26,60 toneladas, a usina poderá operar aproximadamente 13 horas por dia, sendo assim poderá agregar a matriz energética brasileira através do Sistema Interligado Nacional (SIN).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resíduos sólidos urbanos chegam ao aterro sanitário de segunda a sábado, assim quando quantificado verificou-se que atualmente na região urbana do município de Xanxerê - SC são coletados em média 30 toneladas/dia. Ressalta que se estes RSU's que chegam até o aterro sanitário fossem utilizados como uma fonte alternativa poderiam trazer lucros aos municípios, não somente a cidade de Xanxerê, mas aos demais municípios que utilizassem os resíduos seja na geração de energia ou até mesmo de adubo orgânico por meio da compostagem.

Com a massa de resíduos diária que chega ao aterro sanitário municipal há uma geração per capita de 0,77 kg/hab.dia. Tendo em vista que, a população atingida pela coleta de resíduos sólidos urbanos é de 39.142 habitantes, ao comparar a geração per capita municipal com outras regiões se observa que este valor se aproxima com a geração per capita da Região Sul, 0,752 kg/hab.dia.

Desta maneira, pela análise gravimétrica é possível observar que o maior percentual dos resíduos sólidos urbanos é composto por matéria orgânica, de modo a representar 62,90% que corresponde basicamente aos restos de alimentos, que por sua vez poderiam aumentar a eficiência energética se empregados na geração de biogás e, posteriormente este ser convertido em energia elétrica.

Portanto, é possível notar que com a quantidade média de 900,10 toneladas/mês de resíduos sólidos urbanos que chegam ao aterro poderiam gerar aproximadamente 366.970,77 kWh/mês, ou seja, atenderia em média 1.393,00 residências com consumo mensal de 267,20 kWh. Neste caso, se esta energia fosse comercializada por 0,55 R\$/kWh, valor médio da tarifa de energia elétrica urbana no município de Xanxerê - SC, teria uma rentabilidade mensal na faixa de R\$ 201.833,92, sendo ainda possível reduzir o volume de resíduos sólidos e, conseqüentemente a área ocupada pelo aterro sanitário.

REFERÊNCIAS

ABETRE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE RESÍDUOS. **Classificação de resíduos sólidos:** Norma ABNT - NBR 10.004:2004. São Paulo: 2006. Online. Disponível em: <<http://www.abetre.org.br/estudos-e-publicacoes/publicacoes/publicacoes-abetre/classificacao-de-residuos>>. Acesso em: 05 jan. 2018.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004:** Resíduos Sólidos - classificação. Rio de Janeiro: 2004.

_____. **NBR 10.007:** Amostragem de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro: 2004.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014.** Editora Grappa. São Paulo: 2014.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016.** São Paulo: 2016. Online. Disponível em: < <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf> > Acesso em: 25 set. 2017.

ANDREOLI, C. V. ANDREOLI, F. N.; TRINDADE, T. V.; HOPPEN, C. **Resíduos sólidos:** origem, classificação e soluções para destinação final adequada. Online. Disponível em: < http://agrinho.com.br/site/wp-content/uploads/2014/09/32_Residuos-solidos.pdf > Acesso em: 30 set. 2017.

ARAUTERM. **Poder calorífico inferior.** 20--. Online. Disponível em: < http://www.arauterm.com.br/pdf/tabela_pc_inferior.pdf > Acesso em: 05 jan. 2018.

BRASIL. FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual de Saneamento.** 3. ed. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2007.

CONTINENTAL OBRAS E SERVIÇOS. **Coleta de Resíduos.** Online. Disponível em: < <http://continentalobras.com.br/site/coleta-de-residuos-domiciliares/> > Acesso em: 25 set. 2017.

_____. **Aterro Sanitário.** Online. Disponível em: < <http://continentalobras.com.br/site/aterro-sanitario/> > Acesso em: 30 set. 2017.

CORSINI, R. **Usina para incineração de resíduos sólidos**. Online, 2013. Disponível em: < <http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/28/3-geracao-de-energia-por-incineracao-de-lixo-saiba-291153-1.aspx> > Acesso em: 25 set. 2017.

DATAPEDIA. **Xanxerê - SC**. Online. Disponível em: < <https://www.datapedia.info/public/cidade/6275/sc/xanxere#mapa> > Acesso em: 29 jul. 2018.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário estatístico de energia elétrica 2014 - ano base 2013**. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

_____. **Balço energético nacional 2015 - ano base 2014**: relatório síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

_____. **Anuário estatístico de energia elétrica 2016 - ano base 2015**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

_____. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS**. Rio de Janeiro: EPE, 2008.

FREDIGO, N. S.; GONÇALVES, G.; LUCAS, P. F. **Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: 2009.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Santa Catarina – Xanxerê**. Online: 2010. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=421950&search=||infogr%E1ficos:-informa%E7%F5es-completas>> Acesso em: 30 set. 2017.

LIMA, L. M. Q. **Lixo**: Tratamento e biorremediação. 3ed. São Paulo: Hemus, 2004.

LOPES, A. O. F. **Geração de energia elétrica a partir dos resíduos sólidos orgânicos portuários**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

MARAFON, A. C.; SANTIAGO, A. D.; AMARAL, A. F. C.; BIERHALS, A. N.; PAIVA, H. L.; GUIMARÃES, V.S. **Poder Calorífico do Capim Elefante para Geração de Energia Térmica**. Embrapa. Aracaju - SE, 2016.

MILANEZ, B.; MASSUKADO, L. M. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. IPEA – Instituto de Pesquisa de Economia Aplicada. Brasília, 2012.

MUNICIPIO DE XANXERÊ. **Aspecto Geográfico**. Online. Publicado em: 14 abr. 2013. Disponível em: < <http://xanxere.sc.gov.br/cms/pagina/ver/codMapaltem/4790> > Acesso em: 30 set. 2017.

_____. **Aspecto Econômico**. Online. Publicado em: 14 abr. 2013. Atualizado em: 07 jun. 2014. Disponível em: < <http://xanxere.sc.gov.br/cms/pagina/ver/codMapaltem/4789> > Acesso em: 30 set. 2017.

PAVAN, M. C. O. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil**. Tese de Doutorado em Energia. USP: São Paulo, 2010

PEREIRA NETO, J. T. **Gerenciamento do Lixo Urbano: Aspectos Técnicos e Operacionais**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2007.

RIKILS, V. S. S.; SENHORAS, E. M.; BARELLA, L. A.; SANTANA, E. R. R. **Resíduos sólidos na Amazônia: um estudo de caso na Região Metropolitana do Sul do Estado de Roraima**. Revista Espacios. Vol. 37. N° 19. 2016. Online. Disponível em: < <http://www.revistaespacios.com/a16v37n19/16371923.html> > Acesso em: 29 jul. 2018.

SLATER, D. **Cultura do consumo e modernidade**. Editora Nobel. São Paulo: 2002. Online. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=Au3OR-g0xCYC&pg=PA32&dq=sociedade+moderna+de+consumo&hl=pt-BR&ei=JU-tTvX3CsT_y0g_G8ke2CDw&sa=X&oi=book_result&ct=result#v=onepage&q=sociedade%20moderna%20de%20consumo&f=false> Acesso em: 30 set. 2017.

SOARES, E. L. S. F. **Estudo da caracterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos**. UFRJ. Rio de Janeiro: 2011.

SOARES, F. R.; MIYAMARU, E. S.; MARTINS, G. **Desempenho ambiental da destinação e do tratamento de resíduos sólidos urbanos com reaproveitamento energético por meio da avaliação do ciclo de vida na Central de Tratamento de Resíduos - Caieiras**. Revista Eng. Sanit. Ambient. V.22. n.5. set/out 2017.

SOLIDDA ENERGIA. **Turbinas a vapor**. Online. Disponível em: < <http://www.solidda.com.br/microturbinas-a-vapor/st-1000#st-1000> > Acesso em: 29 jul. 2018.

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes renováveis de energia no Brasil**. 1ª Ed. Interciência. Rio de Janeiro: 2003.

APÊNDICE

APÊNDICE A - ENTREVISTA - ATERRO SANITÁRIO DE XANXERÊ - SC

Data: ____ / ____ / ____

Local da Entrevista: _____

(aterro sanitário, área no entorno do aterro, área vizinha ao aterro, outros - especificar)

I - Perfil do Entrevistado

1. Sexo: () Masculino () Feminino

2. Idade: _____

3. Grau de instrução:

() Analfabeto

() Ensino fundamental incompleto () Ensino fundamental completo

() Ensino médio incompleto () Ensino médio completo

() Ensino superior incompleto () Ensino superior completo

4. Local que reside: _____ Tempo de residência: _____

5. Possui coleta de lixo: () Sim () Não

6. Possui coleta seletiva: () Sim () Não

II - Entrevista sobre Informações do Aterro Sanitário Municipal

7. Qual a área do aterro sanitário: _____.

8. Quais os dias e locais em que são realizadas as coletas? _____.

9. Quantas toneladas diárias de resíduos sólidos o aterro sanitário recebe: _____.

10. Qual a vida útil do aterro sanitário: _____.

11. Como é realizada a disposição dos resíduos sólidos urbanos no aterro sanitário: _____.