

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

***CÂMPUS LONDRINA***

**CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

**ISADORA GUILHERME BRANCO**

**ANALISE DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
ORGÂNICOS PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM  
RESIDÊNCIAS DE UM CONDOMÍNIO HORIZONTAL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LONDRINA**

**2015**

**ISADORA GUILHERME BRANCO**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
ORGÂNICOS PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM  
RESIDÊNCIAS DE UM CONDOMÍNIO HORIZONTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Câmpus* Londrina.

Orientador: Admilson Lopes Vieira

Coorientadora: Lisandra Ferreira de Lima

**LONDRINA**

**2015**



**Ministério da Educação**  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Londrina  
Coordenação de Engenharia Ambiental



## TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia

Análise da viabilidade da utilização de resíduos sólidos orgânicos para a produção de energia elétrica em residências de um condomínio horizontal.

por

Isadora Guilherme Branco

Monografia apresentada no dia 25 de novembro de 2015 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Alexandre Sordi  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Guilherme Duenhas de Machado  
(UTFPR)

---

Profa. Msc. Admilson Lopes Vieira  
Orientador

---

Profa. Dra. Ligia Flávia Antunes Batista  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

## AGRADECIMENTOS

As poucas palavras que deixarei nos agradecimentos, certamente não serão suficientes para alcançar todas as pessoas que fizeram parte dessa longa caminhada percorrida durante esta fase tão importante da minha vida. Aqueles que não estiverem entre essas poucas palavras, peço desculpas, mas saibam que fizeram parte desse grande momento, estão em minhas lembranças e possuem toda a minha gratidão.

Como não poderia ser diferente, começo agradecendo aos meus amados pais: Ciro Cesar Zanini Branco e Ivanise Guilherme Branco. Pais estes que estiveram ao meu lado durante toda essa trajetória, que dividiram todo esse período de graduação em cada ligação no final de cada tarde, em cada conversa amiga, em cada incentivo nos momentos de fraqueza. Eles que nunca deixaram de acreditar em mim, que me deram todo suporte emocional e financeiro e por vezes, técnico; sou imensamente grata a vocês por todo amor, carinho e companheirismo desprendido nessa jornada.

À minha irmã, Maria Júlia Guilherme Branco que foi uma grande companheira, me dando todo o amparo e suporte da sua forma e, certamente, estava sempre na torcida para que tudo transcorresse como o planejado.

Ao meu avô, Walter Vicente Branco (*in memoriam*) que nos deixou no decorrer desses cinco anos de graduação. Apesar da dor em função da ausência física, existe a certeza de que ele sempre esteve ao meu lado em todos os momentos para que o desfecho do curso ocorresse da melhor maneira possível.

Às minhas queridas avós, Maria José Zanini Branco e Lurdes Nair Rizzo Guilherme, e ao meu avô Evan Guilherme por todo o afago dado nos momentos de tensão, as orações durante os dias de provas, as velas acesas e toda a boa energia depositada durante esse percurso.

Aos meus tios e tias, que sempre estiveram por perto, proporcionando um “brainstorming” de ideias nos almoços de Domingo ou em ligações despreziosas, para que novos horizontes pudessem ser enxergados.

Aos meus queridos primos, em especial ao Glauco Guilherme Similli e Pedro Guilherme Antico que me escutaram, por vezes, em mesas de bares, almoços e jantares, e tentavam, de alguma forma, transformar minhas angústias e confusões em ideias e soluções.

Aos meus amigos e colegas de classe, em especial a Maria Theresa Bettin Boldarini, Gabriella Menezes de Ornelas e Stephanie Luri Kacuta, pelas parcerias em

trabalhos, pelas noites em claro passando resumos das provas do dia seguinte, pelos cafés em dias de sono, pelas conversas que rendiam gargalhadas em momentos de tensão, pelos engenhariadas vividos, pelas inúmeras experiências e amadurecimentos ao longo desses anos. Obrigada por estarem comigo nessa caminhada e por me apresentarem o real significado da palavra amizade e por serem meu porto seguro durante essa longa estadia na UTFPR.

Ao meu orientador Admilson Lopes Vieira e a minha co-orientadora Lisandra Ferreira de Lima, meus sinceros agradecimentos. Eles que acreditaram em meu potencial e compartilharam seus vastos conhecimentos técnicos com muita paciência e dedicação ao longo do desenvolvimento desse trabalho, por todo empenho, profissionalismo, pela grande disposição em ensinar (independente do horário e dia da semana) e pelas conversas que foram de grande valia durante esse período de graduação, muito obrigada. Sou eternamente grata pela amizade construída ao longo desses cinco anos de parceria acadêmica, pelo carinho e crescimento pessoal e profissional.

A todos os professores que ministraram suas aulas ao longo do curso, sem vocês não teria concluído esta etapa. À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela bolsa concedida para a realização do presente trabalho acadêmico.

E por fim, o agradecimento mais importante, à Deus, por ter colocado em minha vida todas as pessoas acima mencionadas, que me deram todo o amparo para que essa fase da graduação transcorresse da melhor maneira possível.

*“ Todos os seus sonhos podem se tornar  
realidade se você tiver coragem para persegui-los”*

(Walt Disney)

## RESUMO

BRANCO, Isadora G. Análise da viabilidade da utilização de resíduos orgânicos para a produção de energia elétrica em residências de um condomínio horizontal. 2015. 66 f. Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2. – Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. Londrina, 2015.

Com o grande desenvolvimento das cidades, um dos desafios atuais é o gerenciamento dos resíduos sólidos, já que a excessiva geração desses resíduos tem se tornado motivo de preocupação nos grandes centros urbanos, visto que os locais para a disposição adequada desse material encontram-se saturado. Diante desse contexto, o desenvolvimento sustentável tornou-se um dos grandes desafios mundiais, mostrando a responsabilidade da sociedade quanto à proposição de alternativas verdes menos impactantes ao meio ambiente, apontando a necessidade de tecnologias que busquem melhores formas da disposição final desse rejeito. Assim, o presente trabalho tem como objetivo realizar o estudo sobre a viabilidade da implementação de um condomínio horizontal energeticamente sustentável. A proposta está fundamentada na utilização da biomassa oriunda da matéria orgânica produzida pelos condôminos locais como matéria prima para o processo de geração de energia elétrica. No trabalho foi realizada a estruturação da molécula do resíduo sólido orgânico, estimou-se o poder calorífico inferior (PCI) da amostra e comparou-se o resultado com as referências encontradas para o material. Também foi realizada uma análise energética da caldeira e da turbina, estimando-se a quantidade de energia gerada no processo. Por fim, foi realizada uma análise prévia da viabilidade financeira. O estudo concluiu que a biomassa em questão (resíduo sólido orgânico) pode ser utilizada na produção de energia elétrica, reduzindo o consumo de energia das áreas comuns do condomínio horizontal. Apesar de não suprir toda a demanda elétrica da área comum (já que o consumo elétrico é elevado) a utilização da biomassa em questão (resíduo sólido orgânico) gera economias tanto na conta de luz do empreendimento, como também reduz a quantidade de resíduos destinados aos aterros sanitários e, portanto, ajudando na preservação do meio ambiente.

Palavras-chave: Resíduo orgânico, incineração, energia elétrica, viabilidade econômica.

## ABSTRACT

BRANCO, Isadora G. Análise da viabilidade da utilização de resíduos orgânicos para a produção de energia elétrica em residências de um condomínio horizontal. 2015. 66 f. Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2. – Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. Londrina, 2015.

Due to the large development of the cities, one of the current challenges is the management of solid waste, since the excessive production of this kind of waste has become a real concern in the urban centers, once the majority of the sites used for an adequate disposal of this material are saturated. In this context, sustainable development has become one of the major global challenges, so that urban societies now require technological alternatives in the final disposal of this waste that are less impactful to the environment (so-called "green technologies"). Thus, the present work aimed to conduct a study to assess the feasibility of the implementation of an energetically sustainable horizontal condominium. The theoretical proposal was based on the utilization of biomass coming from organic matter produced by local condominium members as raw material for the electricity generation process. Based on the structuring of the organic solid waste molecule was estimated the lower heating value (LHV) of the sample and the result was compared with the values found in the literature. In addition, it was also performed an energetic analysis of the boiler and the turbine, estimating the amount of energy generated in the process. Finally, a preliminary analysis of the financial viability were conducted. The analyzes showed that the biomass from the sample of organic solid waste can be successfully used in the generation of electric energy, supplying, in part, the power consumption of the common area of the horizontal condominium. Although not completely supply the energy demands of the common area (since the power consumption is high), the use of biomass from organic solid waste would generate real savings in energy expenses and but also reduces an amount of waste going to landfill and therefore helping to preserve fare Environment.

Key words: Organic waste; Incineration, Electrical energy, Economic viability.



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Principais fontes de energia elétrica no Brasil.....                                     | 14 |
| Figura 2 - Estimativa da quantidade de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos coletados. .... | 20 |
| Figura 3 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos coletados no Brasil .....                  | 21 |
| Figura 4 – Porcentagem de matéria orgânica tratada em relação ao total coletado.....               | 22 |
| Figura 5 - Taxa de reciclagem de embalagens .....  | 22 |
| Figura 6 - Fluxograma dos subsistemas. ....  | 28 |
| Figura 7 - Planta da usina WTE de recuperação de RSU .....   | 29 |
| Figura 8 - Trabalho e transferências de calor realizadas no ciclo de Rankine .....                 | 34 |
| Figura 9 - Diagrama de temperatura e entropia de um ciclo Rankine.....                             | 35 |
| Figura 10 - Planta de sistema de cogeração.....  | 36 |
| Figura 11 - Geração média de resíduos sólidos no Condomínio A. ....                                | 43 |
| Figura 12 - Molécula de ácido graxo palmítico (16:0).....  | 46 |
| Figura 13 - Molécula de ácido graxo oleico (18:1) .....  | 46 |
| Figura 14 - Molécula de ácido graxo linoleico (18:2).....  | 47 |
| Figura 15 - Molécula de glicose .....  | 47 |
| Figura 16 - Molécula de lactose .....  | 48 |
| Figura 17 - Molécula de valina.....  | 49 |
| Figura 18 - Molécula de leucina .....  | 50 |
| Figura 19 - Molécula de treonina .....   | 50 |
| Figura 20 - Molécula de lisina.....  | 51 |
| Figura 21 - Molécula da metionina.....   | 52 |
| Figura 22 - Bases energéticas e base de cálculo.....   | 56 |
| Figura 23 - Bases energéticas e base de cálculo.....   | 57 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Relação dos países e a composição do lixo, em porcentagem.....  | 20 |
| Tabela 2 – Composição química típica do resíduo orgânico em base seca.....   | 23 |
| Tabela 3 - Materiais encontrados no RSU e seus respectivos PCI's.....  | 31 |
| Tabela 4 – Condições para controle de emissão de poluentes atmosféricos em usinas de processamento térmico de RSU..... | 39 |
| Tabela 5 - Padrões de qualidade do ar.....   | 40 |
| Tabela 6 - Resolução SEMA n° 54/2006 .....   | 41 |
| Tabela 7 - Composição química centesimal da alimentação humana .....   | 44 |
| Tabela 8 - Subdivisões dos grupos utilizados no estudo e suas proporções.....  | 45 |
| Tabela 9 - Composição ácido graxo palmítico (16:0) .....   | 46 |
| Tabela 10 - Composição ácido graxo oleico (18:1).....  | 46 |
| Tabela 11 - Composição ácido graxo linoleico (18:2) .....  | 47 |
| Tabela 12 - Composição da glicose.....   | 47 |
| Tabela 13 - Composição da lactose .....  | 48 |
| Tabela 14 - Composição da valina .....   | 49 |
| Tabela 15 - Composição da leucina.....   | 50 |
| Tabela 16 - Composição da treonina .....   | 50 |
| Tabela 17 - Composição da lisina.....  | 51 |
| Tabela 18 - Composição da metionina .....  | 52 |
| Tabela 19 - PCI do resíduo orgânico encontrado na literatura.....  | 58 |
| Tabela 20 - Fórmula percentual em base seca e base úmida.....  | 58 |
| Tabela 21 - Lucros e custos para a implementação da usina.....   | 63 |

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....  | 13 |
| 2. OBJETIVOS GERAIS .....  | 17 |
| 2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 17 |
| 3. REFERENCIAL TEÓRICO .....   | 18 |
| 3.1. CONCEITO DE RESIDUO SÓLIDO URBANO .....   | 18 |
| 3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....                               | 20 |
| 3.3. INCINERAÇÃO .....   | 23 |
| 3.3.1. Tecnologia de Incineração .....   | 24 |
| 3.4. USINAS DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS .....   | 27 |
| 3.5. PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PELA INCINERAÇÃO DE RSU....                        | 30 |
| 3.6. CICLO DE RANKINE .....  | 32 |
| 3.6.1. Ciclo Ideal de Rankine .....  | 34 |
| 3.7. SISTEMA DE COGERAÇÃO .....  | 36 |
| 3.7.1. Fluido orgânico no ciclo de Rankine (ORC).....                                | 37 |
| 3.8. LEGISLAÇÃO RELACIONADA A QUESTÃO AMBIENTAL .....                                | 38 |
| 3.9. ÁREA DE ESTUDO .....  | 42 |
| 4. METODOLOGIA .....   | 44 |
| 4.1. FORMAÇÃO DA MOLÉCULA DE RESÍDUO ORGÂNICO .....                                  | 44 |
| 4.1.1. Estrutura molecular dos subgrupos apresentados.....                           | 45 |
| 4.2. ESTIMATIVA DO PCI .....   | 52 |
| 4.3. ANÁLISE ENERGÉTICA .....  | 52 |
| 4.3.1. Balanço de massa e energia.....   | 52 |
| 4.4. SIMULAÇÃO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA PELO CICLO DE RANKINE –<br>SIMULADOR COCO..... | 55 |
| 4.5. ANÁLISE ECONÔMICA PRELIMINAR.....   | 55 |

|   |    |
|---|----|
| 5. DISCUSSÕES E RESULTADOS .....  | 56 |
| 5.1. FORMAÇÃO DA MOLECULA DE RESÍDUO ORGÂNICO .....   | 56 |
| 5.2. ESTIMATIVA DO PCI DO COMPOSTO FORMADO .....  | 57 |
| 5.2.1. PCI Mendeliev (Zanatta, 2011) .....  | 58 |
| 5.3. ANÁLISE ENERGÉTICA .....   | 59 |
| 5.3.1. Reação química da molécula de resíduo orgânico e quantidade de oxigênio/ar .....             | 59 |
| 5.3.2. Análise dos equipamentos caldeira e turbina e quantidade de energia gerada no processo ..... | 60 |
| 5.4. ANÁLISE ECONÔMICA PRELIMINAR.....  | 61 |
| 6. CONCLUSÃO .....  | 64 |
| 7. REFERÊNCIAS .....  | 65 |

## 1. INTRODUÇÃO

A sociedade contemporânea encontra-se em uma situação limite, onde o crescimento populacional, o consumismo, as mudanças climáticas, a degradação ambiental e as desigualdades sociais são agravados pelo fato de vivermos em um planeta limitado em termos de espaço físico e recursos.

Com a consolidação do capitalismo após a revolução industrial, os avanços tecnológicos, o acentuado crescimento populacional, o padrão de vida consumista da sociedade moderna e o estímulo ao consumo de bens cada vez menos duráveis, os resíduos sólidos (RS) passaram a apresentar-se como um grande problema no âmbito mundial, já que a geração em excesso desses resíduos tornou-se preocupações constantes nos centros urbanos.

Aliado aos problemas acima mencionados, pode-se incluir o incorreto gerenciamento da limpeza urbana, que juntos tornam-se potenciais agravantes em diversas cidades brasileiras e em todo o continente.

Diariamente são coletadas 125.281 toneladas de resíduos domiciliares e apenas 47,1% desse montante é destinado para aterros sanitários. Do restante, 22,3% vão para aterros que são ditos controlados, 30,5% para lixões e uma parcela insignificante é destinada para a reciclagem (Grimberg, 2004).

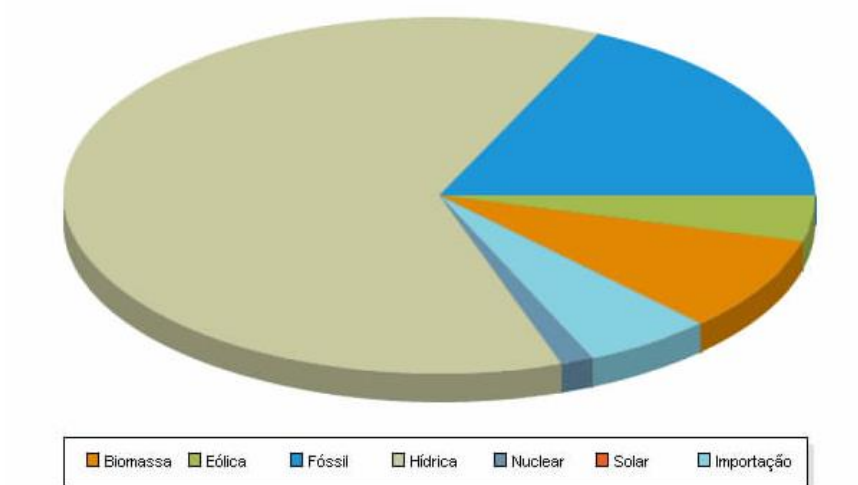
A disposição inadequada desses rejeitos gerados pela população aliado a falta de tratamento dos mesmos resulta na contaminação ambiental, fator esse que favorece não só a proliferação de vetores de doenças, mas também o desperdício material e energético que esses resíduos podem gerar, já que uma parte considerável dos resíduos pode voltar para a sociedade na forma de lucro financeiro.

Segundo Henriques (2004), o desenvolvimento sustentável passou a ser um dos grandes desafios mundiais. O autor ainda destaca a responsabilidade social com relação a alternativas menos impactantes ao meio ambiente, mostrando a necessidade de novas pesquisas em técnicas e tecnologias que busquem rotas alternativas para a disposição final desses rejeitos.

No início desta cadeia, tem-se o consumo de energia elétrica, que também está diretamente relacionado ao desenvolvimento econômico e social do país (Gusmão, Pires e Giannini, 2002). A maior disponibilidade deste recurso à população, embora possa refletir um aquecimento econômico e melhorias na qualidade de vida, apresenta aspectos

negativos como a possibilidade de esgotamento dos recursos utilizados para a produção de energia e ampliação dos impactos ambientais gerados por esta atividade Aneel (2008).

Diversas são as possibilidades de produção de energia elétrica, oriundas de fontes renováveis ou não. No Brasil embora haja um aumento potencial na geração de energia elétrica proveniente de origem hídrica (Figura 1), fonte principal no Brasil (ANEEL, 2002), tornam-se necessárias formas alternativas de produção de energia que atendam aos padrões internacionais de desenvolvimento e sustentabilidade.



**Figura 1:** Principais fontes de energia elétrica no Brasil.  
Fonte: ANEEL, 2002.

Apesar da hidroeletricidade ser a grande geradora de energia elétrica no país em função da água (sua matéria prima) ser o recurso mais abundante na Terra, a tecnologia depende de vários fatores incontrolláveis, como por exemplo, a meteorologia, vazão do rio e quantidade de água disponível. A instabilidade climática vem resultando em drásticos problemas para as usinas hidrelétricas como a falta de água para o abastecimento de suas barragens em função dos longos períodos de seca, resultando na redução da produtividade de energia elétrica (Rosa, 2007).

Além da vertente climática, a hidroeletricidade vem sofrendo sérios questionamentos em função da questão ambiental já que os impactos causados nas áreas inundadas são devastadores para o meio ambiente em que a barragem se encontra inserida (Rosa, 2007).

O autor ainda afirma que diante do contexto acima mencionado, o problema da hidroeletricidade aumenta cada vez mais em relação a vertente ambiental, resultando em um possível movimento de abandono das grandes represas levando, conseqüentemente, ao abandono da hidroeletricidade como uma fonte renovável de energia elétrica no país necessitando, de fontes alternativas para a geração de energia elétrica.

A Lei Federal nº 10.438 – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) foi criada no ano de 2002 com o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos de produtores independentes autônomos, concebidos com base em fontes eólicas, pequenas centras hidrelétricas e biomassa no sistema elétrico nacional. Esse programa está sendo desenvolvido de forma que essas fontes representem 10% da matriz energética nos próximos anos.

Levando em conta a vertente energética, o termo biomassa abrange os derivados recentes de organismos vivos utilizados como combustíveis ou para sua produção, assim, a definição de biomassa exclui o tradicional combustível fóssil utilizado atualmente (petróleo) por ser resultado de várias transformações que requerem milhões de anos para ocorrerem (Mamedes *et al*, 2010).

Assim, biomassa é considerada um recurso natural renovável que pode ser utilizado na produção de energia a partir da degradação desse material orgânico por processos químicos (por exemplo, a incineração) (Mamedes *et al*, 2010).

A utilização de combustíveis (renováveis ou não) na produção de energia elétrica acontece através da queima em uma câmara de combustão (havendo variação da energia liberada em função do calor de combustão do comburente). O fluido (geralmente a água) contido nas tubulações dos trocadores de calor sofrem aquecimento e pressurização até a mudança de fase, transformando-se em vapor. Este vapor ao entrar na turbina consegue movimentar suas pás, que convertem a energia térmica em mecânica e através de um gerador, ocorrendo a conversão de energia mecânica em elétrica.

Mavropoulos (2010) exalta a viabilidade do emprego da tecnologia de incineração como uma opção para a solução de problemas associado a destinação final dos resíduos sólidos urbanos.

De acordo com Henriques (2004), o desenvolvimento mais recente da tecnologia de incineração incluiu a modernização dos sistemas de controle e tratamento de gases de poluentes atmosféricos, apresentando condições para aumentar a aceitabilidade na instalação de usinas de tratamento térmico de resíduos. A incineração permite a redução

do volume dos resíduos em cerca de 90% e a redução de seu peso em 75%, e possibilita, através do calor gerado na combustão a obtenção de energia. Vale ressaltar que diversos países na Europa, os Estados Unidos e o Japão já adotaram a incineração como uma solução para a disposição final de seus resíduos sólidos urbanos, bem como uma forma de aproveitamento energético para o país.

Diante deste quadro, a motivação desta pesquisa é investigar a viabilidade da utilização de resíduo sólido orgânico como biomassa para produção de energia elétrica, buscando minimizar a problemática do acondicionamento dos resíduos produzidos domesticamente de forma a servir como matéria prima para produção de energia elétrica.



## **2. OBJETIVOS GERAIS**

O objetivo principal deste trabalho é realizar um estudo sobre a viabilidade da implementação de um condomínio horizontal energeticamente sustentável. A proposta está fundamentada na utilização da biomassa oriunda da matéria orgânica produzida pelos condôminos locais como matéria prima para o processo de geração de energia elétrica.

### **2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

A partir do objetivo principal proposto acima, os objetivos específicos estipulados nesse trabalho são:

- Analisar a viabilidade energética da matéria prima estudada (resíduo sólido orgânico).
- Realizar balanço de massa e energia para a produção de energia elétrica para cada quilograma de resíduo sólido.
- Analisar a viabilidade do sistema de geração de energia elétrica a partir da biomassa proposta.
- Análise econômica preliminar e tempo de retorno do investimento.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1. CONCEITO DE RESÍDUO SÓLIDO URBANO

As terminologias lixo e resíduos sólidos são, usualmente, utilizadas como sinônimos. De acordo com o dicionário Aurélio, lixo significa “aquilo que se varre da casa, do jardim, da rua e se joga fora: entulho; tudo que não presta”. Já a palavra resíduo vem do latim *residui*, que representa aquilo que se resta de qualquer substância; já o termo “sólido” foi incorporado para diferencia-lo dos demais resíduos (líquidos e gasosos) (Gripp, 1998).

Mandarino (2000), afirma que “lixo está associado à noção da inutilidade de determinado objeto, diferente de resíduo, que permite pensar em nova utilização, quer como matéria prima para produção de outros bens de consumo, quer como composto orgânico para solo”.

A Norma Técnica NBR 10.004, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), define resíduo sólido como sendo:

“Resíduos nos estados sólidos e semi - sólidos, que resultam de atividade da comunidade, de origem: industrial, doméstica, de serviços de saúde, comercial, agrícola, de serviços e varrição.” Ainda para a ABNT, lixo é definido como “restos das atividades humanas, considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis, podendo-se apresentar no estado sólido, semi – sólido ou líquido, desde que não seja passível de tratamento convencional”.

Ainda segundo a ABNT (NBR 10.004/04), resíduos sólidos são aqueles 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 que gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cuja particularidades tonem inviáveis o seu lançamento na rede pública de esgotos ou copos de água, ou exijam para isso soluções técnicas, inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”

Em 2010 foi promulgada a Lei Federal 12.305 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que propõe uma nova forma de agrupar os resíduos, considerando o local e/ou a atividade que ocorre (Brasil, 2010). O Art. 13 desta Lei apresenta as classificações dos resíduos sólidos, que são elas:

I – Quanto à origem:

a) resíduos domiciliares: aqueles originários de atividades domésticas realizados em residência;

b) resíduos de limpeza urbana: provenientes de varrição, limpeza de logradouros e vias públicas;

c) resíduos sólidos urbanos: os que englobam as alíneas “a” e “b”;

d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excluindo os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;

e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: gerados nessas atividades, excetuado os referidos na alínea “c”;

f) resíduos industriais: gerados em processos produtivos e instalações industriais;

g) resíduos de serviços de saúde: gerados nos serviços de saúde;

h) resíduos da construção civil: gerado em construções, reformas, reparos e demolições de obras;

i) resíduos agrossilvopastoris: gerados em atividades agropecuárias e silviculturais;

j) resíduos de serviços e transportes: originários em portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários entre outros locais de transportes;

k) resíduos de mineração: aqueles gerados em atividades de pesquisa, extração ou beneficiamento do minério.

Em suma, Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são aqueles resíduos provenientes das atividades domésticas realizadas nas residências em conjunto com os resíduos provenientes de limpeza urbana que são resultados da varrição, limpeza de logradouro e vias públicas.

Segundo IPEA, a quantidade *per capita* de resíduos sólidos urbanos gerados no ano de 2009 pode ser superior a 1,6 kg/hab.dia, visto que o sul e sudeste tem uma captação média de 99,5% do resíduo gerado. Na Figura (2) temos conseguimos visualizar a quantidade de resíduos gerado por habitante urbano em cada região do país, bem como a quantidade dos resíduos que são coletados.

| Unidade de análise  | Quantidade de resíduos coletados |            | Quantidade de resíduos por habitante urbano |               |
|---------------------|----------------------------------|------------|---|---------------|
|                     | 2000                             | 2008       | 2000  | 2008          |
|                     | (t/dia)                          | (t/dia)    | (kg/hab. dia)                               | (kg/hab. dia) |
| Brasil              | 149.094,30                       | 183.481,50 | 1,1   | 1,1           |
| Municípios pequenos | 53.301,40                        | 79.372,20  | 1,0   | 1,2           |
| Municípios médios   | 47.884,10                        | 62.743,40  | 1,0   | 1,1           |
| Municípios grandes  | 47.908,80                        | 41.365,90  | 1,4   | 1,1           |
| Norte               | 10.991,40                        | 14.637,30  | 1,2   | 1,3           |
| Nordeste            | 37.507,40                        | 47.203,80  | 1,1   | 1,2           |
| Sudeste             | 74.094,00                        | 68.179,10  | 1,1   | 0,9           |
| Sul                 | 18.006,20                        | 37.342,10  | 0,9   | 1,6           |
| Centro-Oeste        | 8.495,30                         | 16.119,20  | 0,8   | 1,3           |

**Figura 2** - Estimativa da quantidade de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos coletados.  
Fonte: IPEA, 2009.

### 3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Segundo Mattos (2005), caracterizar o lixo de uma região e/ou determinar sua composição física dos resíduos gerados por uma população é um trabalho árduo, porém, essencial para qualquer projeto na área de resíduos sólidos.

Os resíduos sólidos urbanos podem ser classificados como recicláveis ou matéria orgânica. Ainda, podem ser subdivididos dentro de recicláveis como plástico, vidro, papel e metal. (Brasil, 2010).

Rodrigues (2001) observa em seu estudo que países com maior renda per capita apresentam um alto percentual de resíduos inorgânicos na composição do resíduo sólido urbano (vidro, papel, plástico e metal). Em contrapartida, os países de menor renda per capita apresenta resíduos com elevadas quantidades de matéria orgânica em seu rejeito. Essa análise pode ser explicada pelo modo de vida adotada em cada um desses lugares e está explicitada na Tabela (1).

Tabela 1 – Relação dos países e a composição do lixo, em porcentagem.

| Países  | Ano  | Metal | Papel | Vidro | Orgânico | Plástico | Outros |
|---------|------|-------|-------|-------|----------|----------|--------|
| Nigéria | 1990 | 5     | 17    | 2     | 43       | 4        | 29     |
| Suécia  | 1987 | 7     | 50    | 8     | 15       | 8        | 12     |
| EUA     | 1983 | 9.2   | 42.7  | 10.3  | 14.6     | 1.7      | 21.5   |
| Áustria | 1992 | 4.9   | 40.3  | 8.1   | 22.4     | 9        | 15.3   |

|           |      |     |      |     |      |     |      |
|-----------|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| Colômbia  | 1989 | 1   | 22   | 2   | 56   | 5   | 14   |
| Dinamarca | 1988 | 4.1 | 32.9 | 6.1 | 44   | 6.8 | 6.1  |
| França    | 1992 | 3.2 | 49   | 9.4 | 16.3 | 8.4 | 13.7 |
| Japão     | 1988 | 1.2 | 43.6 | 1   | 34   | 5.6 | 14.6 |
| Hungria   | 1992 | 4.4 | 20   | 6.1 | 34.7 | 5.7 | 29.1 |

Fonte: Rodrigues, 2001.

O produto encontrado no lixo domiciliar é reflexo cultural da população. Por exemplo, países como Estados Unidos, em função do elevado consumo de alimentos pré – processados apresentam elevadas quantidades de embalagens em seus resíduos sólidos urbanos, enquanto, ao mesmo tempo, apresentam uma reduzida parcela de matéria orgânica em seus rejeitos.

Em um estudo feito pelo IPEA (2009), foi analisada a composição gravimétrica dos materiais coletados no Brasil. Na Figura (3) podemos verificar os dados obtidos com o estudo.

| Materiais                 | Participação | Quantidade       |                  |
|---------------------------|--------------|------------------|------------------|
|                           |              | 2000             | 2008             |
|                           | %            | t/dia            | t/dia            |
| Material reciclável       | 31,9         | 47.558,5         | 58.527,4         |
| Metais                    | 2,9          | 4.301,5          | 5.293,5          |
| Papel, papelão e tetrapak | 13,1         | 19.499,9         | 23.997,4         |
| Plástico                  | 13,5         | 20.191,1         | 24.847,9         |
| Vidro                     | 2,4          | 3.566,1          | 4.388,6          |
| Matéria orgânica          | 51,4         | 76.634,5         | 94.309,5         |
| Outros                    | 16,7         | 24.880,5         | 30.618,9         |
| <b>Total coletado</b>     | <b>100,0</b> | <b>149.094,3</b> | <b>183.481,5</b> |

**Figura 3** - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos coletados no Brasil  
Fonte: IPEA, 2009.

Trazendo o contexto acima apresentado para uma realidade próxima a nossa, temos segundo Mattos (2005), que em um estudo feito no perímetro urbano de Curitiba (Paraná) as caracterizações físicas dos Resíduos Sólidos Urbanos encontradas foram 6% de plástico, 2% de vidro, 2% de metal, 3% de papel, 66% de matéria orgânica e 21% de outros elementos, apresentando coerência com os dados propostos pelo IPT para países em desenvolvimento.

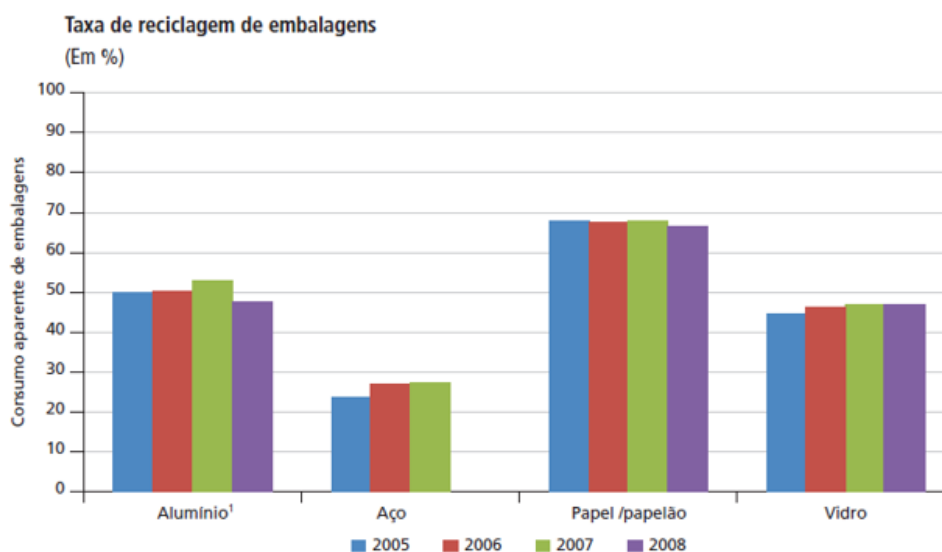
Ainda segundo dados do IPEA (2009), é possível identificar que dentre os materiais que constituem o resíduo sólido urbano, a matéria orgânica é a que possui menor

porcentagem de reuso conforme observa-se nas Figuras (4), sendo a compostagem a única destinação técnica dada aos resíduos orgânicos, enquanto na Figura (5) temos a taxa de reciclagem de embalagens como o vidro, papel/papelão, aço e alumínio.

**Porcentagem de matéria orgânica tratada em relação ao total estimado coletado (2008)**

| Unidade de análise   | Quantidade encaminhada para unidade de compostagem (t/d) | Estimativa da quantidade de matéria orgânica coletada <sup>1</sup> (t/d) | Taxa de tratamento em função da quantidade coletada (%) |
|----------------------|--|--|---|
| <b>Brasil</b>        | <b>1.519,5</b>   | <b>94.309,1</b>  | <b>1,6</b>  |
| Estrato populacional |  |  |   |
| Municípios pequenos  | 497,2  | 40.797,3   | 1,2   |
| Municípios médios    | 495,0  | 32.250,1   | 1,5   |
| Municípios grandes   | 527,7  | 21.262,1   | 2,5   |
| Macrorregião         |  |  |   |
| Norte                | 18,4   | 7.523,5  | 0,2   |
| Nordeste             | 13,0   | 24.262,6   | <0,1  |
| Sudeste              | 684,6  | 35.044,1   | 1,9   |
| Sul                  | 475,3  | 19.193,7   | 2,5   |
| Centro-Oeste         | 328,2  | 8.285,2  | 3,9   |

**Figura 4** – Porcentagem de matéria orgânica tratada em relação ao total coletado.  
Fonte: IPEA, 2009.



**Figura 5** - Taxa de reciclagem de embalagens  
Fonte: IPEA, 2009.

Como os dados acima demonstra, a matéria orgânica é o principal constituinte do resíduo sólido urbano e o que apresenta o menor reaproveitamento. A matéria orgânica é composta por carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio, água e cinzas, no entanto, as frações mássicas de cada um destes compostos variam em função dos hábitos regionais.

Os dados da Tabela (2) representam a fração mássica dos compostos presentes nos resíduos orgânicos de forma generalista.

Tabela 2 – Composição química típica do resíduo orgânico em base seca.

| <b>Composto</b> | <b>Composição em base seca</b> |
|-----------------|--------------------------------|
| Carbono         | 48 %                           |
| Oxigênio        | 37,6 %                         |
| Cinzas          | 5,0 %                          |
| Hidrogênio      | 6,4 %                          |
| Nitrogênio      | 2,6 %                          |
| Enxofre         | 0,4 %                          |

Fonte: Silva *et al.*, 2014.

### **3.3. INCINERAÇÃO**

O processo de incineração é uma das opções para o gerenciamento e reaproveitamento dos resíduos sólidos urbanos, principalmente em projetos com recuperação energética para a produção de eletricidade (WHO, 2007). Porém, uma questão que deve ser muito bem avaliada é a segurança da população do entorno com relação aos poluentes atmosféricos lançados quando empregadas algumas tecnologias, sendo necessário um monitoramento constante das emissões e dos possíveis efeitos relacionados à saúde humana (Gouveia, 2010).

Segundo Gripp (1998), a incineração dos resíduos sólidos urbanos com aproveitamento energético para a geração de energia elétrica é uma alternativa muito utilizada para solucionar problemas de disposição final dos resíduos sólidos e países na Europa, Estados Unidos e Japão já utilizam essa metodologia para minimizar os impactos do resíduo gerado por sua população e em contrapartida gerar energia para os mesmos.

Estudos de Menezes *et al* (2000) indicam que, no Brasil, devido à má gestão das unidades e em função da falta de controle em relação às emissões atmosféricas, a incineração passou a ser vista como um problema. Porém, com a atual crise energética e a busca desenfreada por tecnologias alternativas de geração de energia para complementar

a matriz energética que está fundamentada na hidroeletricidade, a utilização de resíduos sólidos em processos termoelétricos de cogeração ganhou espaço no país (Caixeta, 2008).

De modo geral, a incineração é uma das tecnologias para o tratamento térmico dos resíduos, ou seja, é a queima por um tempo estabelecido de materiais em alta temperatura misturados com uma quantidade de ar apropriada (IPT/CEMPRE, 1995). Lima (1985) diz que no processo de destruição térmica da matéria orgânica ocorre a redução de peso e do volume do lixo através da combustão controlada dos produtos, assim como ocorre a redução das características de periculosidade e patogenicidade presente nos resíduos.

Menezes *et al* (2000) mostram que, atualmente, devemos expandir esse conceito, já que a incineração é um processo de reciclagem da energia liberada na queima dos materiais, sendo possível converter essa energia disponível para a geração de vapor ou produção de energia elétrica. Porém, para que seja uma forma eficiente de bioenergia, é necessário o emprego de equipamentos de controle de poluição (ECP) conforme definido pela Resolução CONAMA n° 316/02 e que ainda atenda aos padrões de emissões exigidos pela legislação vigente (Resolução CONAMA n° 382/06). Sabendo que existem vários tipos de incineradores (dependendo do resíduo que será incinerado), neste trabalho trataremos apenas dos aptos a tratar os resíduos sólidos orgânicos (RSO).

### ***3.3.1. Tecnologia de Incineração***

Há alguns séculos atrás, a tecnologia de incineração não contemplava o controle de emissões de gases poluentes e alguns problemas relacionados a poluição do ar foram associados, negativamente, a tecnologia em questão, já que a mesma sempre foi associada como uma fonte de emissão de gases poluentes.

Os processos de licenciamento ambiental de unidades de processamento térmico de RSU buscam assegurar o controle das emissões atmosféricas. O desenvolvimento mais recente da tecnologia promoveu um ambiente para maior aceitabilidade de unidades de incineração baseadas na tecnologia Waste-to-Energy (WtE). Atualmente, diversos países utilizam essa tecnologia como uma solução para a disposição final dos RSU bem como visando o aproveitamento energético do mesmo (Henriques, 2004).

A tecnologia de incineração WtE é constituída por unidades modulares de duplo estágio. O resíduo sólido urbano é introduzido na câmara primária, local onde ocorre de forma efetiva o processo de combustão. Nesse primeiro estágio, a temperatura varia entre



500°C e 900°C, ocorrendo a volatilização de alguns compostos e a transformação dos resíduos não volatilizados em partículas reduzidas (Machado, 2015).

Após a queima, a quantidade do material resultante do processo de incineração comparada a quantidade inicial de resíduo orgânico é de aproximadamente 12 a 30% em massa e 4 a 10% em volume. As cinzas resultantes do processo de incineração podem ser processadas visando a recuperação de materiais ferrosos e como destino final podem ser empregadas como agregado em formulações de cimento (Machado, 2015)

Por fim, segundo Henriques (2004), as partículas em suspensão (aquelas partículas mais finas resultantes do processo de incineração) são retidas no sistema de tratamento de gases. Esse tratamento pode ser feito pela tecnologia de separação por filtração ou por precipitação eletrostática dessas partículas finas.

### **3.3.1.1. Alimentação da Caldeira**

#### 3.3.1.1.1. Sistema de Grelhas

A alimentação convencional de uma caldeira é o sistema de grelhas pelo tempo de existência e menores custos envolvidos (Silva, 2013). O sistema é formado por quatro compartimentos principais, sendo eles: recepção e alimentação do incinerador, câmara de combustão, sistema de ar e sistema de descarte das cinzas (Yin *et al*, 2008). O sistema funciona na modalidade *Mass Burning*, onde os resíduos a serem incinerados entram no processo na forma bruta, sem tratamento prévio, reduzindo as partes de grande dimensão.

Ainda segundo Yin *et al* (2008), por um sistema mecânico de acionamento, os resíduos são introduzidos no incinerador pela parte inferior da câmara de combustão e sujeitas a um fluxo ascendente de ar, onde as partículas de menores dimensões entram em combustão na própria atmosfera da fornalha, enquanto as maiores partículas se depositam na superfície da grelha, onde são queimadas.

O sistema de grelha pode ser inclinado ou fixo, favorecendo a exposição dos resíduos ao ambiente térmico mediante ao deslizamento gravitacional dos mesmos, desde o ponto de entrada na câmara de combustão até o compartimento de recolhimento das cinzas. Os sistemas móveis contam com estrutura mecânica capaz de promover o transporte do resíduo, desde o ponto de entrada da câmara até o compartimento de recolhimento das cinzas (Machado, 2015)

Por fim, o sistema de grelhas é capaz de processar resíduos combustíveis de diversas formas e tamanhos, contendo maior ou menor teor de umidade. Por não promover a mistura intensa do material em combustão, o processo pode apresentar transientes de instabilidade, que podem ser compensados a partir do controle do ar de sistema secundário.

#### 3.3.1.1.2. Tecnologia de Leito Fluidizado

O leito fluidizado circulante, LFC, apareceu com a concepção de um novo processo gás-sólido, em 1938, num estudo levado a cabo por Warren Lewis e Edwing Gilliland. A primeira análise termodinâmica de uma central de biomassa lenhosa foi projetada na Alemanha, em 1982, para queimar carvão pulverizado na presença de calcário. A central apresentava uma capacidade total de 84 MW (Silva, 2013).

Em reatores de leito fluidizado, o material sólido granulado e inerte presente nos resíduos sólidos urbanos, tal como areia, calcário ou alumina, são mantidos no ambiente em combustão sob condições turbulentas em função das injeções de jato de ar ascendente. A transferência de calor e massa dos resíduos em combustão é garantida pela energia emitida a partir do próprio leito aquecido de material sólido granulado. A turbulência que a injeção de ar promove no ambiente proporciona condições ideais de mistura no interior da câmara de combustão.

Os tipos de incineradores de leito fluidizado operam com excesso de ar compreendido entre 30% e 40% e com temperatura entre 750°C e 850°C, e mostram-se energeticamente mais eficiente do que os sistemas em grelhas (Bontoux, 1999). Os principais incineradores de leito fluidizado são:

- *Bubbling*: o leito fluidizado segue em estado estacionário no fundo da câmara em combustão. O ar primário mantém as partículas em suspensão mediante a velocidade de fluidização, compreendida entre 0.5 m/s e 3.0 m/s. O pré-tratamento dos resíduos é condição fundamental para a garantia da adequada fluidização dos resíduos (Van Caneghem *et al*, 2012).
- *Rotating*: A distribuição não uniforme do ar primário promove o estabelecimento de zonas de menor e maior turbulência, impondo melhores condições de mistura. Admite-se o processamento de resíduos de diferentes tamanhos, sem a necessidade do pré-tratamento.

- *Circulating*: As velocidades elevadas (3.0 m/s à 9.0 m/s) impõem a contínua expulsão das partículas para o exterior da câmara de combustão, separadas por um ciclone externo, retornam novamente ao fundo da câmara de combustão (Van Caneghem *et al*, 2012).

Assim, temos que a grande vantagem dos incineradores de leito fluidizado é a adaptabilidade a uma variedade de tipos de resíduos, incluindo aqueles com maior teor de umidade e menor poder calorífico.

### **3.4. USINAS DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS**

Para Gripp (1998), usinas de incineração de resíduos são o conjunto de instalações necessárias para que se possa realizar o tratamento térmico do material utilizado como fonte de energia, podendo apresentar várias concepções em função do tipo da tecnologia utilizada, do combustível a ser queimado e do volume total material. Essas usinas ficam próximas a centros urbanos ou até mesmo inserida no local, já que é onde se encontra a geração dos resíduos sólidos.

De acordo com o IPT/CEMPRE (1995), alguns aspectos devem ser verificados para a escolha do local a ser instalada uma usina de incineração de resíduos, sendo eles: planos de desenvolvimento para uso futuro da área; proximidade com a fonte geradora do lixo e dos mercados consumidores da energia; zoneamento urbano e sistema viário; acesso a um aterro adequado para a disposição das cinzas e acesso tecnologia de incineração a ser utilizada.

As usinas WTE (waste-to-energy), como dito anteriormente, são aquelas que utilizam os resíduos sólidos urbanos (RSU) para produzir vapor que irá gerar energia elétrica ou será utilizado em processos industriais de aquecimento. O processo de geração de energia elétrica a partir da incineração do RSU é semelhante ao das usinas térmicas convencionais de ciclo de Rankine e sua capacidade de geração elétrica depende diretamente da eficiência da transformação do calor em energia elétrica e do poder calorífico do material a ser incinerado (Norma Técnica DEN 06/08, 2008).

A temperatura do vapor na caldeira deve ser baixa (aproximadamente 200°C) o que faz com que o rendimento da geração de energia elétrica se limite 20%. Esse procedimento é adotado em função da agressividade dos gases da combustão do lixo (Norma Técnica DEN 06/08, 2008).

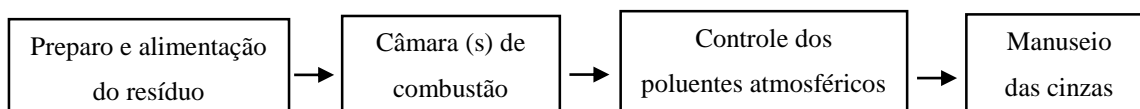
Os componentes básicos principais de uma usina convencional de incineração de RSU são: poço de armazenamento do lixo, grelha móvel, câmara de combustão, sistema de descarga das cinzas, sistema de geração de vapor, depurador de gases, filtros de saco, ventilador e chaminé.

No Brasil, ainda não existem usinas de incineração de RSU com recuperação de energia em escala comercial (Norma Técnica DEN 06/08, 2008), porém, a USINAVERDE, situada no Campus da UFRJ, está desenvolvendo tecnologias para a implantação de usina de incineração como solução ambiental (Machado, 2010). Vale lembrar que países como Estados Unidos, Japão, China e Europa já foram implantadas usinas termoelétricas alimentadas por resíduos desde a década de 80 (Machado, 2010).

Segundo a Norma Técnica DEN 06/08 (2008), nas usinas WTE a geração de energia elétrica acontece de forma permanente ao longo dos dias, visando não acumular os resíduos sólidos urbanos no local. Porém, diferente de outras usinas térmicas, o rendimento de conversão para energia elétrica é relativamente baixa, restringindo-se a trabalhar em temperaturas muito altas.

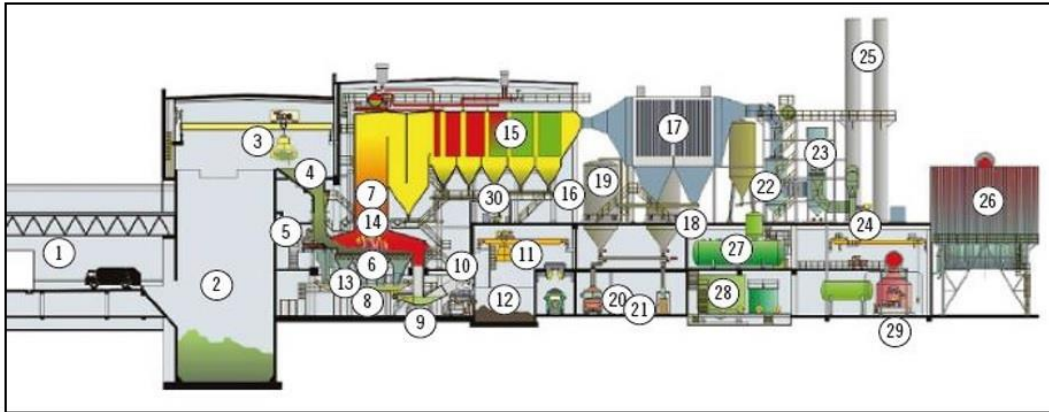
Diante do quadro disposto acima, a queima do material não deve ser feita a temperaturas acima de 450°C, evitando a corrosão dos equipamentos. Nas condições acima mencionada, uma usina WTE pode gerar entre 450 e 600 kWh por tonelada de resíduo sólido urbano (Norma Técnica DEN 06/08, 2008).

Dempsey *et al* (1987) dividem o sistema de incineração de resíduos perigosos em quadro subsistemas, porém, essa configuração de usina também se aplica às unidades que utilizam os resíduos sólidos no processo. Esses subsistemas se dividem de acordo com a Figura (6).



**Figura 6** - Fluxograma dos subsistemas.  
Fonte: Dempsey *et al*, 1987.

O desenho esquemático da Figura (7), apresenta o arranjo geral de uma usina de processamento térmico de RSU feita pela tecnologia WTE. Na legenda da figura tem-se os principais elementos que compõe a usina.



|   |   |   |
|---|---|---|
| 1. Acesso de viaturas e recepção RSU bruto      | 11. Talha – transferência de cinzas para estação de carga bota-fora | 21. Sistema de ensacamento de cinzas e resíduos |
| 2. Armazenamento de RSU bruto ( <i>Bunker</i> ) | 12. Armazenamento de cinzas ( <i>Bunker auxiliar</i> )              | 22. Lavador de gases                            |
| 3. Ponte Rolante – transferência de RSU         | 13. Sistema de ar de combustão primário                             | 23. Filtro de manga                             |
| 4. Acesso à câmara de combustão                 | 14. Ar de Combustão Secundário                                      | 24. Sistema de ventilação                       |
| 5. Alimentação da grelha                        | 15. Caldeira de Recuperação de Calor                                | 25. Chaminé                                     |
| 6. Grelha de Incineração                        | 16. Transportador de cinzas da caldeira                             | 26. Aero condensador                            |
| 7. Fornalha – câmara de combustão               | 17. Sistema de tratamento de gases da combustão                     | 27. Reservatório de água                        |
| 8. Transporte de cinzas                         | 18. Transportador de resíduos do sistema de tratamento de gases     | 28. Planta de desmineralização da água          |
| 9. Remoção de cinzas                            | 19. Armazenamento de cinzas e resíduos                              | 29. Conjunto moto-gerador                       |
| 10. Peneira vibratória                          | 20. Estação de carga bota-fora de cinzas e resíduos                 | 30. Sala de Controle                            |

**Figura 7** - Planta da usina WTE de recuperação de RSU

Fonte: Plastivida, 2012.

Para Dempsey *et al* (1987) alguns procedimentos operacionais devem ser adotados para verificar o funcionamento ideal da usina de incineração e a eficiência do sistema de controle do ar. Esses procedimentos propostos são:

- Manutenção da temperatura de combustão;
- Controle das taxas de adição de reagentes;
- Análise dos tempos de retenção dos gases,
- Avaliação quantitativa da geração de matéria orgânica nas residências;
- Monitoramento das concentrações de monóxido de carbono e, por fim,
- A opacidade da chaminé.

### **3.5. PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PELA INCINERAÇÃO DE RSU**

Estima-se que nos 34 países participantes da OECD (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) 75% dos resíduos urbanos gerados estão disponíveis para serem utilizados como combustíveis, o que prevê um total de 75 Mtep por região (Henriques, 2004). Assumindo uma eficiência típica de geração de 25%, temos a produção de 218 TWh/ano. Dessa forma, estudos feitos pela IEA (1997) – Agência Internacional de Energia, apresenta-se uma evolução na disponibilidade de resíduo sólido urbano para o uso em incineradores, visando a produção de energia elétrica. Ainda segundo a mesma fonte (IEA, 1997), até o ano de 2025 a América do Norte, Europa e Oceania serão responsáveis pela geração de 29, 31 e 14 Mtep de energia elétrica através da combustão do resíduo orgânico, respectivamente. Dados do EPE (2013) nos mostram que, anualmente no Brasil são gerados, aproximadamente, 283.3 Mtep de energia elétrica. Considerando os dados apresentados pelo IBGE (2010), o Brasil possui 5565 municípios. Assim, encontramos que, em média, seria necessário 0.051 Mtep de energia elétrica para abastecer cada uma dessas cidades.

Portanto, com a geração de energia elétrica proposta pela América do Norte, Europa e Oceania até o ano de 2025, esses países seriam capazes de abastecer, respectivamente, a 570, 608 e 275 municípios brasileiros.

Segundo Menezes *et al* (2000), a tecnologia atual de projeto de incineradores prevê a geração de até 0.95 kWh/tonelada processada, sendo que a maioria dos sistemas instalados gera de 0.4 kWh/tonelada à 0.95 kWh/tonelada de sua capacidade.

A quantidade de energia elétrica produzida é diretamente proporcional ao PCI da biomassa. Segundo PetroEnergia Industrial (2014), caracteriza-se como poder calorífico de um combustível (PC) a energia liberada pela sua combustão e, pode ser mensurada como poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI).

Os dois tipos de poder caloríficos se diferenciam pela fase que se encontram os produtos ao final da combustão, sendo que o PCI se caracteriza por todos os produtos em fase gasosa (inclusive a água), e o PCS por todos os produtos em fase gasosa (com exceção da água), que está em fase líquida. Para o presente trabalho utilizaremos o PCI, já que a água será considerada um produto da incineração.

Dessa forma, pode ser calculado o PCI a partir da Equação 1 formulada por Themelis (2003), onde as variáveis  $Y_{combustível}$ ,  $Y_{água}$ ,  $Y_{vidros}$  e  $Y_{metais}$  representam a proporção (kcal/kg) de cada um desses materiais em 1 kg de RSU.

$$PCI = \frac{(18.500*Y_{combustível} - 2,36*Y_{água} - 628*Y_{vidros} - 544*Y_{metais})}{4,185} \quad (\text{Equação 1})$$

Vale lembrar que do peso da fração orgânica combustível (resíduo orgânico) deve ser descontado o peso da água contida nesses elementos orgânicos e, este peso, corresponde a variável  $Y_{água}$ . Na ausência de dados específicos, utiliza-se 60% como estimativa de teor de água (Norma Técnica DEN 06/08, 2008).

Na Tabela (3), tem-se a relação dos materiais encontrados normalmente no RSU e os respectivos PCI's (Norma Técnica DEN 06/08, 2008).

Tabela 3 - Materiais encontrados no RSU e seus respectivos PCI's

| MATERIAL  | kcal/kg |
|-----------|---------|
| Plásticos | 6.300   |
| Borracha  | 6.780   |
| Couro     | 3.630   |
| Têxteis   | 3.480   |
| Madeira   | 2.520   |
| Alimentos | 1.310   |
| Papel     | 4.030   |

Fonte: Norma Técnica DEN 06/08 (2008)

Segundo a mesma Norma Técnica DEN 06/08 (2008) o PCI pode ser um indicativo para saber se a incineração é considerada viável ou não para a biomassa em questão. Assim, determina-se que:

- 1)  $PCI < 1.675$  kcal/kg: incineração não é tecnicamente viável (existe a necessidade da adição de combustível auxiliar);
- 2)  $1.675$  kcal/kg  $< PCI < 2.000$  kcal/kg: a viabilidade técnica depende de algum tipo de pré-tratamento que eleve o PCI;

3)  $PCI > 2.000 \text{ kcal/kg}$ : a queima bruta é tecnicamente viável.

Para Tolmasquim (2003), com a incineração controlada dos RSU é possível abastecer uma usina termoelétrica com potência instalada de 16 MW com 500 toneladas diárias de resíduo, o que representa um potencial energético de aproximadamente 0.77 MWh/tonelada. Sabendo que uma casa com 4 moradores consome aproximadamente 234,6 kWh (ANEL, 2003), temos que 0.2346 MWh/tonelada são necessários para abastecer a residência.

Dados da EPA (2004), mostram que a incineração pode produzir até 550 kWh/tonelada, porém, deve ser levando em conta que pode haver perdas nas linhas de transmissão de 5% do total produzido, assim, para uma visão otimista o valor bruto da produção é de 523 kWh/tonelada.

### **3.6. CICLO DE RANKINE**

A utilização de turbinas a vapor é a forma mais usual de se obter aproveitamento energético de resíduos sólidos por processos térmicos. Entretanto, alguns conceitos termodinâmicos são necessários para o entendimento pleno da tecnologia de aproveitamento energético proveniente da combustão dos resíduos sólidos. Dentre os processos, o ciclo de Rankine é um dos que merecem atenção.

Segundo Henriques (2004), o Ciclo de Rankine nada mais é do que a conversão da energia térmica ( $Q$ ) em trabalho mecânico ( $W$ ). Como fonte externa de energia ( $Q_{in}$ ), o calor é fornecido a um sistema hidráulico onde o circuito utiliza água superaquecida (vapor) para conversão de energia em trabalho mecânico. Esse é o sistema que propicia o funcionamento de motores a vapor, responsável por grande parte de energia elétrica produzida no mundo.

Sabe-se que os processos que acontecem em usinas de vapor são complexos, de modo que algumas idealizações são necessárias para o desenvolvimento de modelos termodinâmicos. Esses modelos termodinâmicos ajudam em uma dedução qualitativa sobre como algumas alterações nos principais parâmetros de operação afetam o desempenho real do sistema, além de propiciarem ajustes simples, onde com eles é possível investigar as funções e os benefícios e características que melhoram o desempenho como um todo (Moran e Shapiro, 2006).

No ciclo Rankine, a unidade de massa do fluido de trabalho fica submetido a um ciclo termodinâmico quando circula através de uma série de componentes interligados

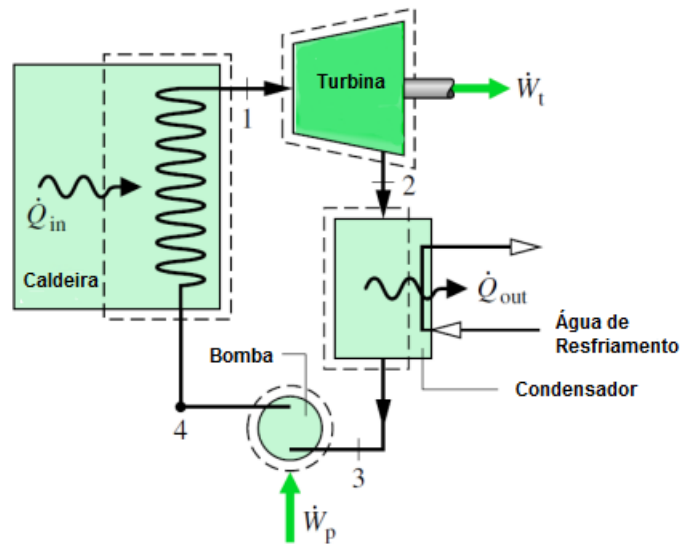


(Moran e Shapiro, 2006). Ainda segundo Moran e Shapiro (2006) importantes conceitos termodinâmicos para ciclos de potência são válidos para Rankine, e os principais conceitos são:

- Primeira Lei da Termodinâmica: O trabalho líquido desenvolvido por um sistema sujeito a um ciclo de potência deve ser igual a energia líquida adicionada por transferência de calor ao sistema.
- Segunda Lei da Termodinâmica: Estabelece que a eficiência térmica de um ciclo de potência seja inferior a 100%.

O sistema de aproveitamento energético é formado por quatro principais componentes que são eles: bomba (responsável pela circulação da água através do sistema), caldeira (onde a água armazenada é aquecida e vaporizada a partir do calor da combustão dos resíduos), turbina (utiliza a pressão do vapor gerado na caldeira para produzir energia mecânica) e condensador (onde ocorre o resfriamento e condensação do vapor que sai da turbina) (Logan, 1999).

O trabalho e as transferências de calor do sistema estão ilustrados na Figura (8) que representa o Ciclo de Rankine, onde a energia térmica obtida na combustão (caldeira) aquece a água transformando a mesma em vapor de elevada temperatura e pressão que se expande no interior da turbina gerando a energia elétrica. Ao sair da turbina, o vapor encontra-se com menor pressão e é condensado pelo sistema de refrigeração (condensador) voltando ao seu estado inicial (líquido) que será bombeado para novamente para a caldeira.



**Figura 8** - Trabalho e transferências de calor realizadas no ciclo de Rankine.  
 Fonte: Moran e Shapiro, 2006.

### 3.6.1. Ciclo Ideal de Rankine

Para considerar-se um ciclo ideal de Rankine, o fluido de trabalho deve passar pelos componentes do sistema sem haver irreversibilidade, não perderá pressão em função do atrito na caldeira e no condensador, fluindo nesses componentes com pressão constante. Ainda, na ausência de irreversibilidades e sem transferência de calor com a vizinhança, o processo através da bomba e da turbina deve ser isentrópico (Morgan e Shapiro, 2006).

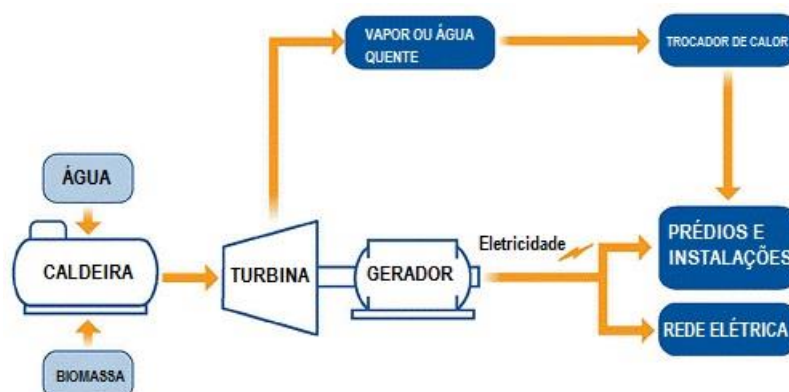
A partir da Figura (9), podemos observar a sequência de processos reversíveis internos que o fluido de trabalho passa.



de energia. Nesse caso, além da geração de energia elétrica, tem-se o aproveitamento de energia térmica proveniente do vapor (gases quentes).

### 3.7. SISTEMA DE COGERAÇÃO

Sistema de cogeração ou combinação de calor e energia é a utilização de um motor de calor ou uma estação de energia que gera, simultaneamente, eletricidade e calor. Segundo o IFC Internacional Company (2008), as turbinas a vapor geram energia elétrica a partir do vapor de água produzido dentro da caldeira, assim, a energia é transferida para a turbina em função da elevada pressão e, essa transferência, alimenta as turbinas e o gerador. Como ocorre a separação das funções do sistema, possibilita-se que o sistema opere com uma variedade de combustíveis, podendo ser considerados como biomassa ou biocombustíveis. Na Figura (10), temos o esboço de uma planta de sistema de cogeração.



**Figura 10** - Planta de sistema de cogeração.

Fonte: United States Environmental Protection Agency, 2008.

A Cogeração é um investimento economicamente positivo, já que o mesmo apoia as políticas governamentais em relação a diminuição na emissão de gás carbônico entre outros gases poluentes (Shipley *et al*, 2008). Dessa forma temos que o Sistema de Cogeração é considerado uma tecnologia de produção de calor, energia elétrica e energia térmica com uma boa performance em relação a disponibilidade, custos e possíveis impactos gerados ao meio ambiente.

Normalmente, uma caldeira é capaz de produzir vapor em pressões moderadas, mas para a distribuição em rede é necessário que o vapor saia em baixas pressões. Nessas situações, a turbina de vapor utiliza o vapor em altas pressões para produzir energia elétrica e libera vapor em baixa pressão para a rede de distribuição.

Segundo Dornburg *et al* (2001) a eficiência do Sistema de Cogeração é baseado em aproximações e a eficiência térmica varia entre 70% e 85%, variando de acordo com a fonte de energia. A eficiência adotada para os cálculos neste trabalho será de 80% onde ainda será considerado que 60% da energia produzida é calor e 20% eletricidade.

Porém, uma forma de elevar o rendimento de aproveitamento energético da incineração é o ciclo combinado híbrido, que se baseia utilização de gases de exaustão na combustão da turbina a óleo ou a gás natural para superaquecer o vapor de baixa temperatura proveniente da caldeira de incineração. Essa configuração pode elevar a eficiência do ciclo Rankine a mais de 30%, apresentando um ganho marginal na ordem de 50% sobre o rendimento da parcela de incineração do ciclo combinado (EPE, 2008).

A relação entre a quantidade de energia obtida do ciclo Brayton e a quantidade de energia obtida no ciclo Rankine que otimiza o rendimento do ciclo combinado híbrido varia entre 55% e 67%. Assim, o consumo unitário do ciclo combinado híbrido, depende do poder calorífico dos resíduos incinerados, é da ordem de 1.2 toneladas de RSU por MWh (EPE, 2008).

### ***3.7.1. Fluido orgânico no ciclo de Rankine (ORC)***

Nos últimos anos, grandes esforços foram feitos para aumentar a produção de energia renovável no mercado mundial. Sabendo que o poder da cogeração por biomassa é uma das opções mais interessantes para uma energia sustentável e confiável em função da sua alta disponibilidade, foram feitos estudos para aumentar sua eficiência. (Drescher, 2006)

A energia elétrica é, normalmente, gerada por processos baseados no ciclo de Rankine com água como o fluido de trabalho. O Organic Rankine Cycle (ORC) é um processo que utiliza um fluido de funcionamento orgânico em vez da água. Comparando os dois fluidos de trabalho, os fluidos orgânicos são vantajosos quando as temperaturas máximas são baixas (temperatura máxima do processo é limitada a 600 K) e/ou o potência da planta é pequena. Em baixas temperaturas, fluidos orgânicos podem elevar a eficiência

do ciclo quando comparado à água e ainda, em pequenas plantas, os fluidos orgânicos possuem destaque já que eles elevam a eficiência das turbinas. (Drescher, 2006)

Porém, para de utilizar os fluidos orgânicos, deve-se considerar vários critérios, sendo eles:

- A estabilidade do fluido e a compatibilidade com os materiais em contato;
- Aspecto de segurança, saúde e ambiente;
- Disponibilidade;
- Custos;

Além das vertentes mencionadas acima, outros parâmetros devem ser considerados para a seleção do fluido, onde os parâmetros principais são as temperaturas máximas e mínimas do processo.

Para operar uma usina de biomassa ORC termodinamicamente eficiente é necessário que o limite de temperatura máxima do processo seja baixo (variando entre 523 K à 623 K), a temperatura de vaporização alta e uma elevada entalpia de entrada. Ainda, para operar uma usina de biomassa com temperatura máxima, é necessário que a pressão esteja entre 0,9 e 1,5 MPa. Vale ressaltar que a eficiência do processo está intimamente ligada com a temperatura, ou seja, se deslocarmos a temperatura para 623 K, a eficiência ganharia 2,5% no processo. (Drescher, 2006)

Por fim, para que seja eficiente a utilização do fluido ORC no processo de cogeração de energia, deve ser feito um estudo prévio do sistema para ver se o mesmo atende os requisitos apresentados anteriormente para o sistema operar com eficiência máxima.

### **3.8. LEGISLAÇÃO RELACIONADA A QUESTÃO AMBIENTAL**

A Resolução CONAMA n° 316/2002 dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistema de tratamento térmico de resíduos. A citada Resolução é quem rege as normativas estabelecidas para usinas de incineração, ou seja, é ela que determina os métodos de tratamento térmico dos resíduos e estabelece os procedimentos operacionais, limites de emissão, critério de desempenho, controle, tratamento e disposição final do rejeito, de modo a minimizar os impactos causados no meio ambiente e à saúde pública resultante dessas atividades. Na Tabela (4) encontram-se as condições

de emissão de poluentes atmosféricos em usinas de processamento térmico de resíduo sólido urbano.

Tabela 4 – Condições para controle de emissão de poluentes atmosféricos em usinas de processamento térmico de RSU.

| ELEMENTOS POLUENTES | CONAMA n° 316/2002               |
|---------------------|----------------------------------|
| PARTICULADOS        | 70 mg/Nm <sup>3</sup>            |
| SO <sub>x</sub>     | 280 mg/Nm <sup>3</sup>           |
| NO <sub>x</sub>     | 560 mg/Nm <sup>3</sup>           |
| HCl                 | 80 mg/Nm <sup>3</sup> a 1.8 kg/h |
| CO                  | 125 mg/Nm <sup>3</sup>           |
| COMPOSTOS FLUORADOS | 5 mg/Nm <sup>3</sup>             |
| INORGÂNICOS         |                                  |
| DIOXINAS E FURANOS  | 0.5 mg/Nm <sup>3</sup>           |

Fonte: Resolução CONAMA 316/2002

Além da Resolução CONAMA n° 316/2002, existem outros instrumentos normativos e legais aplicados ao controle de processos térmicos no Brasil, que são eles:

1) Resolução CONAMA n° 05/89, que prevê os padrões nacionais de qualidade do ar (Tabela 5), institui o PRONAR (Programa Nacional de Qualidade do Ar) e especifica os critérios para o monitoramento e inventário de fontes emissoras e poluentes atmosféricos.

2) Resolução CONAMA n° 03/90, que define os padrões primários e secundários para o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), ozônio (O<sub>3</sub>), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), fumaça, partículas em suspensão e partículas inaláveis;

Tabela 5 - Padrões de qualidade do ar.

| POLUENTE                                 | Tempo de amostragem | Padrão primário<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Padrão secundário<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|--|---------------------|---|---|
| PARTICULAS TOTAIS EM SUSPENSÃO           | 24 horas            | 240   | 150   |
| (PTS)                                    | 1 ano               | 80  | 60  |
| FUMAÇA                                   | 24 horas            | 150   | 100   |
|  | 1 ano               | 60  | 40  |
| PARTICULAS INALÁVEIS (PI)                | 24 horas            | 150   | 150   |
|  | 1 ano               | 50  | 50  |
| DIÓXIDO DE ENXOFRE (SO <sub>2</sub> )    | 24 horas            | 365   | 100   |
|  | 1 ano               | 80  | 40  |
| MONÓXIDO DE CARBONO (CO)                 | 1 hora              | 40.000  | 40.000  |
|  | 8 ano               | 10.000  | 10.000  |
| OZÔNIO (O <sub>3</sub> )                 | 1 hora              | 160   | 160   |
| DIÓXIDO DE NITROGÊNIO (NO <sub>2</sub> ) | 1 hora              | 320   | 190   |
|  | 1 ano               | 100   | 100   |

Fonte: Resolução CONAMA 05/1989

Para serem aceitos os padrões estabelecidos na Tabela (5) ficam definidas as seguintes condições: temperatura de 25°C e a pressão de 101,32 kPa. As médias para PTS são geométricas e para o restante das substâncias são apenas médias aritméticas. E os valores mencionados não devem ser excedidos mais de uma vez por ano.

3) Resolução CONAMA n° 264/99, que dispõe sobre o licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividade de co-processamento de resíduos, executando-se os resíduos domiciliares brutos, os resíduos de serviço de saúde, os radioativos, explosivos, organoclorados, agrotóxicos e afins. Porém, o co-processamento deve atender aos critérios técnicos fixados na Resolução mencionada, complementados, sempre que necessário, pelos Órgãos Ambientais competentes, de modo a atender as peculiaridades regionais e locais.

Porém, como dito na Resolução CONAMA n° 264/99, existem Órgãos Ambientais competentes para atender as necessidades regionais ou locais. Como nossa área de estudo é em Londrina/ Paraná, temos a Secretaria do Meio Ambiente e Recursos



Hídricos que estabelece condições para o controle de emissão de poluentes em usinas de processamento térmico de RSU. As legislações vigentes para essas necessidades são:

1) Resolução CEMA n° 71/2009, que estabelece a exigência e os critérios na solicitação e emissão de Autorizações Ambientais para coprocessamento de resíduos em fornos de cimento, com fins de substituição de matéria prima ou aproveitamento energético.

2) Resolução SEMA n° 54/2006 que define os critérios para o Controle da Qualidade do Ar como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem-estar da população e melhoria da qualidade de vida. Segundo a Resolução em questão, as emissões geradas de tratamento térmico ou incineração não devem ultrapassar os padrões expostos na Tabela (6).

Tabela 6 - Resolução SEMA n° 54/2006

| ELEMENTOS POLUENTES             | SEMA n° 54/2006  |
|---------------------------------|--|
| PARTICULADOS                    | 70 mg/Nm <sup>3</sup>  |
|                                 | Classe I (Cd, Hg, TI) 0.28 mg/Nm <sup>3</sup>                                    |
| PARTICULADOS INORGÂNICOS        | Classe II (As, Co, Ni, Te, Se) 1.4 mg/Nm <sup>3</sup>                            |
|                                 | Classe III (Sb, Pb, Cr, CN, Cu, Sn, F, Mn, Pt, Pd, Rh, V) 7.0 mg/Nm <sup>3</sup> |
| SO <sub>x</sub>                 | 280 mg/Nm <sup>3</sup>   |
| NO <sub>x</sub>                 | 560 mg/Nm <sup>3</sup>   |
| CO                              | 125 mg/Nm <sup>3</sup>   |
| COMPOSTOS CLORADOS INORGÂNICOS  | 80 mg/Nm <sup>3</sup> à 1.8 kg/h   |
| COMPOSTOS FLUORADOS INORGÂNICOS | 5 mg/Nm <sup>3</sup>   |
| DIOXINAS E FURANOS              | 0.5 ng/Nm <sup>3</sup>   |

Fonte: Resolução SEMA 54/2006

Devido às altas concentrações de substâncias associadas aos gases efluentes e devido à elevada concentração dos próprios gases, tem-se a necessidade de dotar a instalação de incineração com um avançado sistema de controle de poluição atmosférica.

Por fim, podemos dizer que a Resolução CONAMA 316/2002 é menos restritiva do que a Resolução SEMA 54/2006.

Segundo Plastivida, 2012, a neutralização e remoção de substâncias perigosas é um dos objetivos do processo. Para isso, utiliza-se sistemas baseados em processos físico-químicos que possuam lavagem ácida, alcalina e de aerossóis. Complementando esse sistema, utilizam-se filtros de manga para o abatimento de materiais particulados finos e precipitadores eletrostáticos para a remoção de poeiras. O emprego de filtros absorventes de carvão ativado podem ser úteis na redução da emissão de dioxinas e mercúrio.

A emissão e formação de dioxinas e furanos podem ser evitadas pelo controle do material a ser incinerado, em outras palavras, em função do controle da concentração de cloro dos resíduos. Outra forma preventiva é a temperatura elevada no processo de incineração (2000°C), a quantidade e forma de distribuição do ar aplicado, utilização adequada de combustível auxiliar ao processo, curto tempo de resfriamento dos gases da combustão e o tratamento em lavadores a seco e filtro de mangas (Caixeta, 2005).

Além da poluição a partir de emissão de gases poluentes, usinas de incineração de RSU apresentam outros tipos de impactos ambientais durante sua implantação em função da complexidade de suas obras, de operação, do lixiviado gerado, das cinzas de combustão, dos metais não ferrosos e ferrosos, dos resíduos do sistema de tratamento de gases de combustão e das cinzas da caldeira. A quantidade de poluentes varia em cada uma das etapas apresentadas acima, além da tecnologia de incineração empregada, das condições operacionais e de padrões de controle (IEA, 1997).

### **3.9. ÁREA DE ESTUDO**

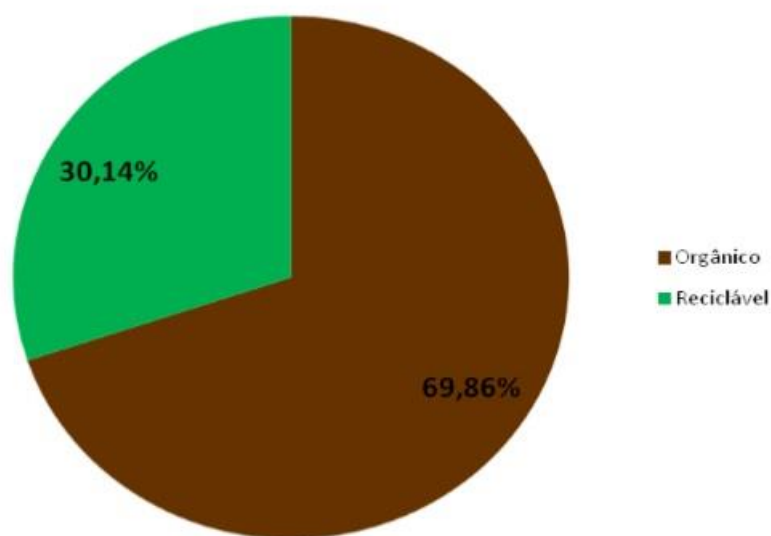
O presente trabalho propõe, como área de estudo um condomínio horizontal localizado na zona sul da cidade de Londrina (Estado do Paraná) que no decorrer do trabalho será chamado Condomínio A. Os dados referentes a área de estudo foram obtidos a partir do trabalho de Salsa (2013).

O condomínio conta com aproximadamente 300 residências, computando 1200 moradores no local, considerando uma quantidade média de 4 pessoas por residência. Estima-se que o valor do condomínio varia entre R\$400,00 à R\$600,00 e que a maior parte da população residente no local sejam os proprietários das residências, porém, o valor das poucas casas que estão abertas para aluguel, o valor varia entre R\$1200,00 a R\$1600,00. Esse quadro nos mostra que os moradores do Condomínio A apresentam

rendas favoráveis para um possível financiamento da usina elétrica para o abastecimento local.

A coleta interna de material orgânico e rejeito é feita três vezes por semana (segundas, quartas e sextas-feiras), enquanto o reciclável é coletado apenas duas vezes por semana (terças e quintas-feiras). O Condomínio A dispõe de um depósito de materiais orgânicos e rejeitos, que se localiza na parte externa do condomínio (Salsa, 2013).

O estudo apresentado por Salsa (2013), mostra que no condomínio estudado, houve predominância de resíduos orgânicos (70% de resíduos orgânicos e 30% de reciclável, aproximadamente), conforme Figura (11).



**Figura 11** - Geração média de resíduos sólidos no Condomínio A  
Fonte: Salsa, 2013.

O trabalho ainda nos mostra que a população residente no Condomínio A gera, em média, 2869.6 kg de material orgânico e 1390 kg de material reciclável, semanalmente. Assim, conseguimos concluir que, mensalmente, ocorre a geração média de 12913,2 kg de resíduo orgânico.

A partir dos dados coletados no trabalho mencionado, tem-se que o descarte de resíduo *per capita* é de aproximadamente 10.76 kg ao mês de resíduo orgânico e 15.97 kg de resíduo sólido urbano (que contabiliza a parte orgânica e reciclável). Em síntese o condomínio horizontal A tem uma geração per capita diária de 341,67 gramas de resíduo orgânico (biomassa).

## 4. METODOLOGIA

A análise de viabilidade será dividida nos seguintes tópicos:

- Formação fictícia de uma única da molécula que represente o resíduo sólido orgânico
- Estimativa do PCI da amostra e análise de resultados com referências encontradas
- Análise energética na Caldeira
- Análise energética na Turbina
- Estimativa da quantidade energética gerada e pré-análise da viabilidade financeira

### 4.1. FORMAÇÃO DA MOLÉCULA DE RESÍDUO ORGÂNICO

Tendo em vista que o resíduo orgânico é constituído de restos alimentares, e não existe uma padronização de sua composição e, conseqüentemente do seu poder calorífico, adotou-se que a composição desse resíduo é similar ao da alimentação humana, composta principalmente por carboidratos, lipídeos e proteínas. Esses grupos de macronutrientes foram de fundamental importância para realizarmos o estudo energético e estimarmos a molécula de resíduo sólido orgânico.

Segundo Fausto *et al* (2001), as refeições apresentam, em média, a seguinte composição proximal (Tabela 7).

Tabela 7 - Composição química centesimal da alimentação humana

| Composição Química | Porcentagem (%) |
|--------------------|-----------------|
| Proteínas          | 4,74            |
| Lipídeos           | 10,84           |
| Carboidratos       | 24,32           |
| Fibras             | 3,3             |
| Cinzas             | 1,0             |
| Umidade            | 55,8            |

Fonte: Fausto *et al*, 2001.

Como o objeto de estudo é a incineração dos materiais orgânicos, foram considerados no estudo, somente os grupos proteínas, lipídeos e carboidratos, uma vez

que as fibras, cinzas e umidade não interferem na quantidade de energia gerada no processo.

No entanto, cada um desses macronutrientes representa uma classe de compostos e não possui estrutura ou mesmo uma massa molar única. Para especificar a análise optou-se pelas moléculas nas proporções relacionadas na Tabela 8 para representar cada uma dessas macromoléculas. Vale ressaltar que as proporções utilizadas para cada subgrupo foram estimadas e para o estudo das proteínas foram utilizados os principais aminoácidos que as compõe, já que não foi possível identificar as estruturas moleculares básicas das proteínas em função da grande variedade que as mesmas podem apresentar.

Tabela 8 - Subdivisões dos grupos utilizados no estudo e suas proporções

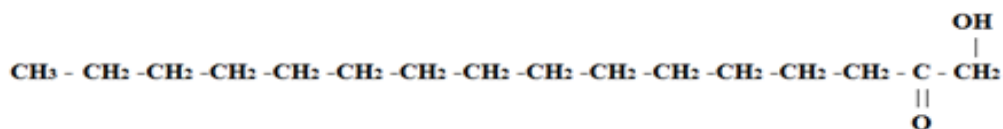
| Proteína        | Lipídeos   | Carboidratos   |
|-----------------|------------|----------------|
| Valina – 20%    | 16:0 – 20% | Glicose – 90 % |
| Leucina – 20%   | 18:1 – 30% | Lactose – 10%  |
| Treonina – 20%  | 18:2 – 50% |                |
| Lisina – 20%    |            |                |
| Metionina – 20% |            |                |

Fonte: Branco, 2015.

#### 4.1.1. Estrutura molecular dos subgrupos apresentados

Nos tópicos abaixo, serão apresentadas as moléculas de cada subgrupo que mencionamos anteriormente, bem como tabelas com a suas composições elementares.

1) Ácido graxo palmítico (16:0): É um dos ácidos graxos saturados mais comuns e pode ser encontrado em animais ou plantas em pequenas quantidades, e no azeite de dendê, leite e sementes de algodão (Biomedicina, 2013). Sua estrutura pode ser visualizada na Figura (12) e os grupos funcionais estão apresentados na Tabela (9).



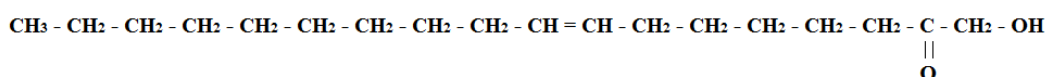
**Figura 12** - Molécula de ácido graxo palmítico (16:0)

Tabela 9 - Composição ácido graxo palmítico (16:0)

| Grupos                  | Quantidades |
|-------------------------|-------------|
| C                       | 16          |
| H                       | 32          |
| O                       | 2           |
| <b>Massa Molar (MM)</b> | <b>256</b>  |

Fonte: Branco, 2015.

2) Ácido graxo oleico (18:1): É o principal ácido graxo das gorduras, chegando a ocupar 80% dos ácidos graxos presentes no azeite de oliva. É o ácido graxo do tipo monoinsaturado, considerado um tipo de “gordura saudável”. É uma fonte de energia para o bom funcionamento do corpo humano, além de ajudar na manutenção das membranas das nossas células e agir como antioxidante no organismo. Alguns alimentos ricos em ácido oleico são amendoim, azeite de oliva, óleo de girassol, milho e algodão (Biomedicina, 2013). Sua estrutura pode ser visualizada na Figura (13) e os grupos funcionais estão apresentados na Tabela (10).



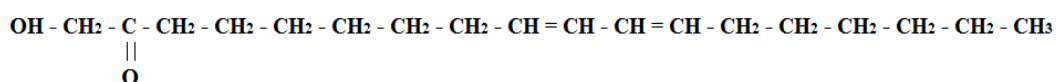
**Figura 13** - Molécula de ácido graxo oleico (18:1)

Tabela 10 - Composição ácido graxo oleico (18:1)

| Grupos                      | Quantidades |
|-----------------------------|-------------|
| C                           | 18          |
| H                           | 34          |
| O                           | 2           |
| <b>Massa Molecular (MM)</b> | <b>282</b>  |

Fonte: Branco, 2015.

3) Ácido graxo linoleico (18:2): É o ácido graxo insaturado ômega-6 com 18 carbonos e duas instaurações. É muito importante para a dieta humana, já que o nosso organismo não é capaz de produzi-lo e ele é o precursor para outros ácidos graxos. Pode ser ingerido nos seguintes alimentos: peixes e frutos do mar, óleo de canola, sementes oleaginosas e óleo de milho e girassol (RGNutri, 2015). Sua estrutura pode ser visualizada na Figura (14) e os grupos funcionais estão apresentados na Tabela (11).



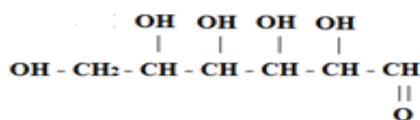
**Figura 14** - Molécula de ácido graxo linoleico (18:2)

Tabela 11 - Composição ácido graxo linoleico (18:2)

| Grupos                      | Quantidades |
|-----------------------------|-------------|
| C                           | 18          |
| H                           | 34          |
| O                           | 2           |
| <b>Massa Molecular (MM)</b> | <b>280</b>  |

Fonte: Branco, 2015.

4) Glicose: É um dos carboidratos mais importantes e pode ser consumida *in natura* em vários frutos ou seu consumo pode ser na forma industrializada, em alimentos que contém amido. Alimentos como pão, batata e feijão são fontes de carboidrato e podem ser consideradas fontes de açúcar (Zanin, 2015). Sua estrutura pode ser visualizada na Figura (15) e os grupos funcionais estão apresentados na Tabela (12).



**Figura 15** - Molécula de glicose

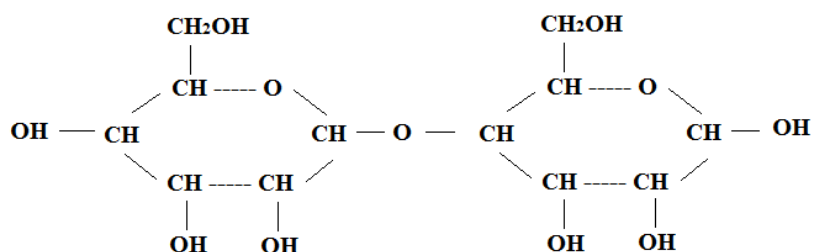
Tabela 12 - Composição da glicose

| Grupos | Quantidades |
|--------|-------------|
|--------|-------------|

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| C                           | 6          |
| H                           | 12         |
| O                           | 6          |
| <b>Massa Molecular (MM)</b> | <b>180</b> |

Fonte: Branco, 2015.

5) Lactose: É o açúcar presente no leite e seus derivados. Alimentos como leite, manteiga, queijos e até algumas bolachas apresentam esse tipo de açúcar (Zanin, 2015). Sua estrutura pode ser visualizada na Figura (16) e os grupos funcionais estão apresentados na Tabela (13).



**Figura 16** - Molécula de lactose

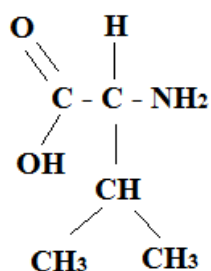
Tabela 13 - Composição da lactose

| <b>Grupos</b>               | <b>Quantidades</b> |
|-----------------------------|--------------------|
| C                           | 12                 |
| H                           | 22                 |
| O                           | 11                 |
| <b>Massa Molecular (MM)</b> | <b>342</b>         |

Fonte: Branco, 2015.

6) Valina: É um dos aminoácidos que compõe a proteína dos seres vivos. Alimentos ricos em valina são a carne, peixe, leite, iogurte, queijo e ovo (Zanin, 2014). Sua estrutura pode ser visualizada na Figura (17) e os grupos funcionais estão apresentados na Tabela (14).





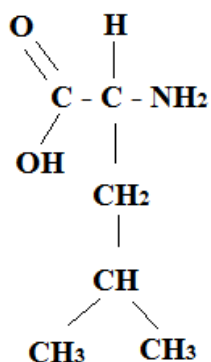
**Figura 17** - Molécula de valina

Tabela 14 - Composição da valina

| Grupos                      | Quantidades |
|-----------------------------|-------------|
| C                           | 5           |
| H                           | 11          |
| O                           | 2           |
| N                           | 1           |
| <b>Massa Molecular (MM)</b> | <b>117</b>  |

Fonte: Branco, 2015.

7) Leucina: É um dos aminoácidos que compõe a proteína dos seres vivos. Pode ser obtida pela ingestão de feijão, ervilhas, castanhas e grãos (Zanin, 2015). Sua estrutura pode ser visualizada na Figura (18) e os grupos funcionais estão apresentados na Tabela (15).



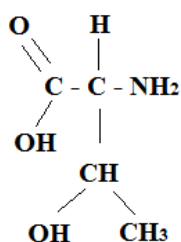
**Figura 18** - Molécula de leucina

Tabela 15 - Composição da leucina

| Grupos                      | Quantidades |
|-----------------------------|-------------|
| C                           | 6           |
| H                           | 13          |
| O                           | 2           |
| N                           | 1           |
| <b>Massa Molecular (MM)</b> | <b>131</b>  |

Fonte: Branco, 2015.

8) Treonina: É o aminoácido essencial à proteína. Os alimentos ricos em treonina são os grãos, abacate, cogumelos, batata inglesa, chuchu, berinjela, beterraba, rabanete, quiabo, aspargos, brócolis, pepino, cebola roxa, tomate, couve e cereais (Zanin, 2014). Sua estrutura pode ser visualizada na Figura (19) e os grupos funcionais estão apresentados na Tabela (16).



**Figura 19** - Molécula de treonina

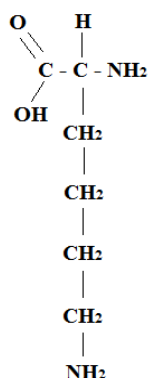
Tabela 16 - Composição da treonina

| Grupos                      | Quantidades |
|-----------------------------|-------------|
| C                           | 4           |
| H                           | 9           |
| O                           | 3           |
| N                           | 1           |
| <b>Massa Molecular (MM)</b> | <b>119</b>  |

Fonte: Branco, 2015.

9) Lisina: É um aminoácido essencial e altamente hidrofílico. Alimentos com lisina são carne de peru, leite desnatado, tremoço, gema de ovo, soja, carne de frango e

galinha (Zanin, 2015). Sua estrutura pode ser visualizada na Figura (20) e os grupos funcionais estão apresentados na Tabela (17).



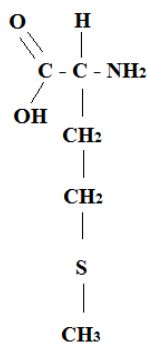
**Figura 20** - Molécula de lisina

Tabela 17 - Composição da lisina

| Grupos                      | Quantidades |
|-----------------------------|-------------|
| C                           | 6           |
| H                           | 14          |
| O                           | 2           |
| N                           | 2           |
| <b>Massa Molecular (MM)</b> | <b>146</b>  |

Fonte: Branco, 2015.

10) Metionina: É um aminoácido que compõe a proteína e pode ser encontrado em ovo desidratado, castanha do Pará, leite de vaca desnatado, queijos, oleaginosas entre outros alimentos (Zanin, 2014). Sua estrutura pode ser visualizada na Figura (21) e os grupos funcionais estão apresentados na Tabela (18).



**Figura 21** - Molécula da metionina

Tabela 18 - Composição da metionina

| <b>Grupos</b>           | <b>Quantidades</b> |
|-------------------------|--------------------|
| C                       | 5                  |
| H                       | 11                 |
| O                       | 2                  |
| N                       | 1                  |
| S                       | 1                  |
| <b>Massa Molar (MM)</b> | <b>149</b>         |

Fonte: Branco, 2015.

## **4.2. ESTIMATIVA DO PCI**

Como valor de referência para poder calorífico inferior (PCI) foram utilizados valores obtidos em trabalhos científicos e artigos acadêmicos com a finalidade de comparar com o PCI encontrado a partir da metodologia Mendeliev (Zanatta, 2011) para a molécula de resíduo sólido orgânico formada (Equação 2).

$$PCI = 339 * C + 1030 * H - 109 * (O - S) - 24 * W \quad (\text{Equação 2})$$

## **4.3. ANÁLISE ENERGÉTICA**

Foi realizada uma análise energética dos equipamentos térmicos envolvidos no processo de incineração e a quantidade de energia gerada no sistema.

### ***4.3.1. Balanço de massa e energia***

#### ***4.3.1.1. Turbina***

Partindo da caldeira (estágio 1), o vapor passa a ter temperatura e pressão elevadas, se expande na turbina para produzir trabalho. Posteriormente, passa pelo condensador (estágio 2) com baixa pressão. Se desprezarmos a transferência de calor para a vizinhança, o balanço das taxas de massa e energia no regime estacionário para um

volume de controle no entorno da turbina tomam a forma da Equação 3 (Moran e Shapiro, 2006).

$$\frac{Wt}{m} = h1 - h2 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:  $m$  - vazão mássica do fluido de trabalho circulante,

$Wt/m$  taxa onde o trabalho é desenvolvido por unidade de massa de vapor que passa pela turbina.

#### ***4.3.1.2. Condensador***

É onde ocorre a transferência de calor do fluido de trabalho para a água de resfriamento que movimentada-se em um circuito estabelecido. O fluido de trabalho se condensa e elevando a temperatura da água de resfriamento. O balanço das taxas de massa e energia para um volume de controle onde encontra-se um dos lados do trocador de calor em regime estacionário. Para esse sistema possuímos a Equação 4 (Moran e Shapiro, 2006).

$$\frac{Qt}{m} = h2 - h3 \quad (\text{Equação 4})$$

Onde  $Qt/m$  é a taxa que a energia é transferida pelo calor do fluido de trabalho para a água de resfriamento por unidade de massa de fluido de trabalho que passa pelo condensador.

#### ***4.3.1.3. Bomba***

Pela sequência do ciclo, o líquido que sai do condensador é bombeado para caldeira com uma alta pressão. Pensando que a bomba se encontra em um volume de

controle e aceitando-se que não há transferência de calor para as vizinhanças os balanços de massa e energia fornecem a Equação 5 (Moran e Shapiro, 2006).

$$\frac{Wb}{m} = h4 - h3 \quad (\text{Equação 5})$$

Onde  $Wb/m$  é a potência de entrada por unidade de massa que passa pela bomba.

#### **4.3.1.4. Caldeira**

Completa-se um ciclo quando o fluido de trabalho quando o líquido deixa a bomba e é aquecido até a situação de saturação e evapora na caldeira. Se considerarmos os tubos e tambores da caldeira envoltos por um volume de controle, os balanços de massa e energia nos fornecem a Equação 6 (Moran e Shapiro, 2006).

$$\frac{Qentra}{m} = h4 - h1 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde  $Qentra/m$  é a taxa de transferência de calor da fonte de energia para o fluido de trabalho por unidade de massa que passa pela caldeira.

#### **4.3.1.5. Parâmetro de desempenho**

A eficiência é um dos parâmetros de desempenho que mede a quantidade de energia fornecida ao fluido de trabalho que passa pela caldeira que é convertido em trabalho líquido de saída. Assim, temos que a eficiência térmica do ciclo de potência pode ser expressa como na Equação 6 (Moran e Shapiro, 2006).

$$\eta = \frac{\frac{Wt}{m} - \frac{Wb}{m}}{\frac{Qentra}{m}} = \frac{(h1-h2)-(h4-h3)}{(h1-h4)} \quad (\text{Equação 7})$$

Vale lembrar que durante a operação do sistema a eficiência da caldeira deve ser controlada, buscando manter um alto rendimento e evitar perdas de calor. Dentre as perdas existentes em uma caldeira podemos citar as associadas ao combustível nas cinzas de fundo, à radiação e convecção e ineficiência da combustão. Isto faz com que os processos reais sejam irreversíveis e com eficiências inferiores as idealizadas quando analisado o ciclo de Rankine adiabático e isentrópico.

#### **4.4. SIMULAÇÃO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA PELO CICLO DE RANKINE – SIMULADOR COCO**

O programa escolhido para realizar a simulação do presente trabalho foi o software COCO (Cape – Open to Cape – Open). Este é um ambiente computacional de simulação gratuito e livre, já que o download do simulador é feito gratuitamente pelo site do programa e o termo livre atribuído a ele compreende que podem ser feitas adequações e implementações no software, tornando o mesmo completo para o estudo.

#### **4.5. ANÁLISE ECONÔMICA PRELIMINAR**

Por fim, foi feita uma análise econômica preliminar pelo método de payback simples (PBS) para analisar superficialmente a viabilidade econômica do projeto em questão.

Vale lembrar que Payback representa o período de duração para que o investimento inicial de um empreendimento seja recuperado. Assim, o PBS é obtido calculando-se o número de anos que será necessário para que os fluxos de caixa futuros acumulados se igualem ao investimento inicial (Fonseca, 2013). Matematicamente, podemos descrever payback simples como:

$$\textit{Payback}(\textit{tempo de retorno}) = \frac{\textit{Investimento Inicial}}{\textit{Ganho no período}} \quad (\text{Equação 8})$$

## 5. DISCUSSÕES E RESULTADOS

### 5.1. FORMAÇÃO DA MOLECULA DE RESÍDUO ORGÂNICO

Considerando a composição elementar de lipídeos, proteínas e carboidratos apresentadas anteriormente, temos que as mesmas são compostas basicamente pelos seguintes elementos químicos: carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) e ainda, algumas moléculas apresentam nitrogênio (N) e enxofre (S) em sua composição molecular.

Para a realização desse estudo foi levado em consideração as porcentagens estabelecidas previamente para cada grupo (proteína/lipídeos/carboidratos) e subgrupos, suas respectivas massas (kg), o número de mols (n) e a composição elementar.

Sabendo que a composição centesimal do resíduo sólido orgânico pode apresentar três bases distintas, sendo elas base seca que não leva em conta a umidade, base úmida que considera a umidade ou base combustível (ou também denominada de base seca sem cinzas) que faz uma análise elementar do composto estudado (carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre), desconsiderando umidade, fibras e cinzas, já que esses últimos não interferem no poder calorífico do material (Bizzo, 2012). Para a definição da molécula, foi utilizada como referência a base combustível, já que posteriormente verificamos o poder energético da mesma.

|             | Umida   | Combustível | Seca    |                  |          |                   |
|-------------|---------|-------------|---------|------------------|----------|-------------------|
| Carboidrato | 24,32%  | 60,95%      | 55,02%  | Base de cálculo  | 0,136326 | kg per capita/dia |
| Proteína    | 4,74%   | 11,88%      | 10,72%  | Base Combustível |          |                   |
| Lipídios    | 10,84%  | 27,17%      | 24,52%  |                  |          |                   |
| Umidade     | 55,80%  |             |         | Carboidratos     | 0,083094 | kg                |
| Fibras      | 3,30%   |             | 7,47%   | Lipídeos         | 0,037037 | kg                |
| Cinzas      | 1,00%   |             | 2,26%   | Proteína         | 0,016195 | kg                |
|             | 100,00% | 100,00%     | 100,00% |                  |          |                   |
|             |         |             |         |                  | 0,136326 | kg per capita/dia |

**Figura 22** - Bases energéticas e base de cálculo.  
Fonte: Branco, 2015



A base de cálculo utilizada no estudo levou em consideração a geração per capita de resíduo orgânico (0,34167 kg) subtraindo as proporções dos valores de umidade, fibras e cinzas.

|           |        | Porcentagem de cada composto | Massa (kg)  | n (MOL) | C  | H  | O  | N | S |
|-----------|--------|------------------------------|-------------|---------|----|----|----|---|---|
| Glicose   | 180,16 | 0,9                          | 0,07478473  | 0,415   | 6  | 12 | 6  |   |   |
| Lactose   | 342,3  | 0,1                          | 0,008309414 | 0,024   | 12 | 22 | 11 |   |   |
| Linoleico | 282,46 | 0,3                          | 0,011111108 | 0,039   | 18 | 34 | 2  |   |   |
| Oleico    | 280,44 | 0,5                          | 0,018518514 | 0,066   | 18 | 32 | 2  |   |   |
| Palmitico | 256,42 | 0,2                          | 0,003239032 | 0,013   | 16 | 32 | 2  |   |   |
| Valina    | 117,51 | 0,2                          | 0,003239032 | 0,028   | 5  | 11 | 2  | 1 |   |
| Leucina   | 131,17 | 0,2                          | 0,003239032 | 0,025   | 6  | 13 | 2  | 1 |   |
| Treonina  | 119,12 | 0,2                          | 0,003239032 | 0,027   | 4  | 9  | 3  | 1 |   |
| Lisina    | 146,19 | 0,2                          | 0,003239032 | 0,022   | 6  | 14 | 2  | 2 |   |
| Metionina | 149,21 | 0,2                          | 0,003239032 | 0,022   | 5  | 11 | 2  | 1 | 1 |
|           |        |                              |             |         | 6  | 11 | 3  | 0 | 0 |

**Figura 23** - Bases energéticas e base de cálculo.  
Fonte: Branco, 2015.

A partir da Figura (23) foi possível propor que a fórmula molecular mínima para resíduo sólido orgânico apresenta a seguinte composição elementar:  $C_6H_{11}O_3$ .

Como as quantidades de nitrogênio e enxofre são muito inferiores quando comparadas ao carbono, hidrogênio e oxigênio, as mesmas foram desconsideradas. Vale salientar que o nitrogênio e enxofre foram desconsiderados pautados na resolução do CONAMA 316/2002 que prevê até uma emissão de até 280 mg/Nm<sup>3</sup> de SO<sub>x</sub> e 560 mg/Nm<sup>3</sup> de NO<sub>x</sub> em usinas de processamento térmico de RSU.

## 5.2. ESTIMATIVA DO PCI DO COMPOSTO FORMADO

Na Tabela (19) temos os valores de PCI encontrados na literatura que foram utilizados na comparação com o PCI calculado pela metodologia de Mendeliev (Zanatta, 2011).

Tabela 19 - PCI do resíduo orgânico encontrado na literatura.

| Referência                          | PCI (KJ/kg) |
|-------------------------------------|-------------|
| Norma Técnica (DEN 06/08, 2008)     | 5481,04     |
| Elena Casian (Casian, 2013)         | 4650,00     |
| Alexandre Maranhão (Maranhão, 2008) | 3079,42     |

### 5.2.1. PCI Mendeliev (Zanatta, 2011)

Considerando a molécula de resíduo orgânico formada anteriormente ( $C_6H_{11}O_3$ ) e sabendo que sua massa molar é de 131 g/mol, temos as seguintes proporções de base úmida e base seca para o composto (Tabela 20).

Tabela 20 - Fórmula percentual em base seca e base úmida

| Elemento Químico | Fórmula percentual em base seca (%) | Fórmula percentual em base úmida (%) |
|------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| C                | 55                                  | 24,3                                 |
| H                | 8,4                                 | 3,7                                  |
| O                | 36,6                                | 16,2                                 |
| Umidade          | 0                                   | 55,8                                 |

Fonte: Branco, 2015.

Através dos dados apresentados na tabela acima e da Equação 7, foi calculado o PCI da molécula de resíduo orgânico. Os cálculos seguem abaixo.

$$PCI = 339 * C + 1030 * H - 109 * (O - S) - 24 * W \quad \text{Equação 9}$$

$$PCI = 339 * (24,3) + 1030 * (3,7) - 109 * (16,2 - 0) - 24 * 55,8$$

Equação 10

$$PCI = 8.943,7 \text{ KJ/kg} \rightarrow 8,94 \text{ MJ/kg}$$

Objetivando verificar a dispersão estatística entre os dados encontrados na literatura e o valor de PCI calculado, foi realizado o cálculo de desvio padrão pela Equação 9.

$$Desvio\ padrão = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (xi - xmédio)^2} \quad \text{Equação 11}$$

Tendo em vista os valores de referência do PCI do resíduo orgânico descritos na Tabela 20 e o PCI calculado, encontramos que o valor médio para PCI é 5,54 MJ/kg e o desvio padrão 2,61 MJ/kg quando comparado a média encontrada.

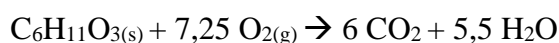
Diante dos resultados apresentados acima, podemos afirmar que o valor calculado para PCI e desvio padrão encontrados para a biomassa de resíduo sólido orgânico são aceitáveis uma vez que quando comparados a outras biomassas (como por exemplo a cana de açúcar que a faixa de PCI que varia entre 9 MJ/kg e 19 MJ/kg), entende-se que os valores encontrados para resíduos sólidos orgânicos apresentam-se dentro da normalidade uma vez que sua composição química elementar e suas proporções são variáveis dependendo da amostra analisada.

### 5.3. ANÁLISE ENERGÉTICA

#### *5.3.1. Reação química da molécula de resíduo orgânico e quantidade de oxigênio/ar*

Para que se tenha uma combustão completa do material combustível é preciso administrar um volume de ar maior que o volume de ar teórico para que se possa garantir uma mistura ideal entre o ar e o combustível com o tempo de permanência do material na câmara de combustão. Esse conceito é usualmente denominado de excesso de ar necessário para a combustão, que é muito importante para a operação correta de fornos e caldeiras.

Para o cálculo de excesso de ar, consideramos a seguinte reação de combustão:

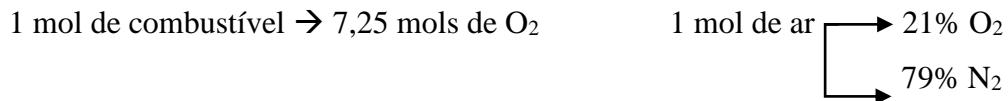
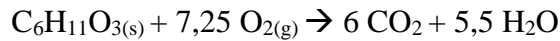


Assim em 1 mol de combustível, temos 7,25 mols de oxigênio. Considerando 1 mol de ar contendo 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio a massa molar do ar é de 28,84 g/mol ( $MM_{\text{ar}} = 0,21 \cdot 32 + 0,79 \cdot 28$ ).

Ainda considerado que 1 mol de combustível possui 0,21 mols  $\text{O}_2$  em 1 mol de ar foi calculada a quantidade de mols de ar necessária para a combustão do composto que utiliza 7,25 mols de  $\text{O}_2$ .

Por fim, temos que são necessários 34,52 mols de ar, ou seja, 995,55 g de ar para a combustão de 1 mol de  $C_6H_{11}O_3$ , obtendo uma razão estequiométrica de 7,59 kg de ar/kg de combustível.

Os cálculos realizados para obtenção dos resultados apresentados serão descritos abaixo.



$$MMar = \% (O_2) * MM(O_2) + \% (N_2) * MM(N_2)$$

$$MMar = (0,21 * 32) + (0,79 * 28) \rightarrow \mathbf{MMar = 28,84 \text{ g/mol}}$$

$$1 \text{ mol combustível} \rightarrow 7,25 \text{ mols de } O_2 = 0,21 \text{ mols } O_2 * y$$

$$y = 34,52 \text{ mols de ar} \rightarrow \mathbf{y = 995,55 \text{ g de ar}}$$

**Razão estequiométrica = 4,56 kg de ar/ kg de combustível**

### ***5.3.2. Análise dos equipamentos caldeira e turbina e quantidade de energia gerada no processo***

As condições de idealidade para a caldeira são: sistema adiabático (sistema onde não ocorre trocas de calor e/ou matéria com o meio externo), a água que será aquecida pelo processo de incineração da biomassa estudada encontra-se (inicialmente) à pressão ambiente (1 atm) e temperatura ambiente (25°C) e a entalpia de combustão é  $\Delta H_c = 2300$  KJ/kg de vapor.

Sabendo que, diariamente, são gerados 340 g de resíduo orgânico por pessoa, temos uma vazão mássica de 4,72 g/s.

$$vazão \text{ mássica} = \frac{340 \text{ g}}{1 \text{ dia}} * \frac{1200 \text{ pessoas}}{1} * \frac{1 \text{ dia}}{24 \text{ horas}} * \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ segundos}} = 4,72 \text{ g/s}$$

Utilizando a média dos PCI's encontrados nas referências (PCI = 4383,48 KJ/kg) temos que:

$$Q = \text{vazão mássica} * PCI$$

$$Q = 4,72 \frac{g}{s} * 4383,48 \frac{KJ}{Kg} \rightarrow Q = 20,69 KJ/s$$

Sabendo que cada 2300 KJ é convertido em 1 kg de vapor, temos que nossa vazão mássica de vapor que sai da caldeira é de, aproximadamente, 0,009 kg/s.

$$\text{vazão mássica de vapor} = \frac{20,69 \frac{KJ}{s}}{2300 \frac{KJ}{Kg \text{ de vapor}}} \rightarrow \text{vazão mássica de vapor} = 0,009 \text{ kg/s}$$

Para a turbina, as condições de entrada que foram consideradas: sistema isentrópico (sistema onde não ocorre variação de entropia), pressão de entrada (10 bar) e temperatura de entrada (200°) e eficiência da turbina  $\eta = 40\%$ .

Alimentando o simulador COCO (Cape – Open to Cape – Open) com as condições de contorno acima mencionadas, tivemos uma geração de energia elétrica de 32,44 kwh/dia.

#### **5.4. ANÁLISE ECONÔMICA PRELIMINAR**

Para a análise econômica preliminar, foi feito um cálculo de payback simples que teve como objetivo calcular o tempo de retorno do investimento feito com a implantação da usina de incineração no condomínio horizontal.

A análise levou em consideração o custo dos equipamentos que deveriam ser adquiridos pelo empreendimento (caldeira, turbina e gerador), o valor da economia em função da energia elétrica gerada no processo e a redução do custo em função da destinação final do resíduo orgânico.

Para o cálculo da economia com relação a geração de energia elétrica, utilizou-se a geração de energia encontrada anteriormente (32,44 kwh/dia) e a taxa de R\$ 0,75 para cada kwh consumido (COPEL, 2015), resultando em uma economia de R\$ 729,90 mensalmente. A demonstração matemática pode ser observada abaixo.

$$32,44 \frac{kwh}{dia} * 30 \text{ dias} = 973,2 \text{ kwh gerados por mês}$$

$$\text{Economia} = 973,2 \text{ kwh} * 0,75 = \text{R\$ } 729,90 \text{ mensalmente}$$

A partir do Decreto nº 769 de novembro de 2009, são grandes geradores de resíduos pessoas físicas ou jurídicas que gerem, a partir de suas atividades econômicas ou não, uma quantidade excedente a 600 litros/semana. Enquanto os pequenos geradores (ou também denominados geradores domésticos) são aqueles que geram uma quantidade de resíduo inferior a 600 litros/semana provenientes de habitações unifamiliares ou unidades de habitação, tendo o direito à coleta pública.

Diante deste decreto, atualmente o condomínio em estudo não pode ser considerado um grande gerador, porém, existe um interesse do município em tornar os condomínios (tanto horizontais como verticais) em grandes geradores, uma vez que eles acabam gerando resíduos nas áreas comuns de lazer, resíduos de varrição e em toda área administrativa do local.

Assim, com essa mudança, será necessário terceirizar o serviço de coleta de resíduos. Para o estudo tomou-se como base os contratos feitos por uma empresa que oferece o sistema de coleta, tratamento e destinação final de forma adequada para os resíduos orgânicos na cidade de Londrina.

Para esta empresa atender grandes geradores, ela determina em seus contratos que, mensalmente, será desembolsado pelo estabelecimento uma tarifa fixa de R\$ 1350,00 para que se faça a coleta 3 vezes por semana recolhendo 1200 L em cada visita e, quando necessário, cobra-se uma alíquota de R\$ 150,00 para cada 1200 L excedente.

Sabendo que o condomínio horizontal geral 2869,6 kg de resíduo orgânico por semana e que o peso específico do material orgânico é de 290 kg/m<sup>3</sup>, temos um volume gerado de 44,53 m<sup>3</sup> o que totaliza 44553 litros de resíduo orgânico por mês.

Tomando como base os dados do contrato anteriormente mencionado, o condomínio horizontal gastaria mensalmente para destinar seus resíduos orgânicos aproximadamente R\$ 4891,25.

Por fim, na Tabela 21 temos uma descrição aproximada dos gastos necessários para a aquisição dos equipamentos necessários para a implementação da usina de geração de energia elétrica e dos lucros gerados no processo.

Tabela 21 - Lucros e custos para a implementação da usina.

| Produto                              | Valor                        |
|--------------------------------------|------------------------------|
| Caldeira de Biomassa (Caldeiras IMA) | (investimento) R\$ 30.000,00 |
| Turbina 2 KW (BR Mini Turbinas)      | (investimento) R\$ 10.000,00 |
| Gerador 2 KW (Alterima)              | (investimento) R\$ 2.900,00  |
| Geração de energia elétrica          | (lucro mensal) R\$ 729,90    |
| Destinação do resíduo orgânico       | (lucro mensal) R\$ 4891,25   |

Fonte: Branco, 2015.

Calculando o payback da implementação do sistema, temos que o tempo de retorno para se pagar o investimento e o condomínio começar a ter lucro é de 8 meses, apresentando um lucro mensal de R\$5.621,15 a partir do 9 mês.

Em outra perspectiva: tendo em vista que uma lâmpada de led tem uma potência de 66 W (Novicki, 2008) e fica ligada por aproximadamente 10 horas por noite e a energia elétrica produzida proveniente da biomassa estudada é de 973,2 kwh/mês, temos que, mensalmente, 49 lâmpadas de led seriam abastecidas sem custos no condomínio. Os cálculos estão apresentados abaixo.

$$\text{Energia diária consumida por uma lâmpada} = 66W * 10 h = 660 wh$$

$$\text{Energia mensal consumida por uma lâmpada} = 66 wh * 30 dias = 19,8 \frac{kwh}{mês}$$

$$\text{Quantidade de lâmpadas abastecidas} = \frac{973,2}{19,8} = 49 \text{ lâmpadas}$$

## **6. CONCLUSÃO**

Através do estudo, pode-se perceber a grande importância ambiental de novas alternativas para a destinação final de resíduos sólidos orgânicos, uma vez que esses quando destinados a aterros sanitários ocupam grandes volumes e geram diversos impactos sócio - ambientais.

A alternativa proposta no decorrer deste trabalho foi a utilização dos resíduos orgânicos como fonte de biomassa para sistemas térmicos de combustão. Foi avaliado seu potencial energético e concluiu-se que o mesmo poderia ser utilizado com sucesso na produção de energia elétrica reduzindo o consumo de energia nas áreas comuns do condomínio horizontal, apesar de não suprir toda a demanda do empreendimento já que o consumo elétrico no local é elevado.

Apesar de não suprir toda a demanda elétrica da área comum do local estudado, a utilização da biomassa gera economias tanto na conta de luz do empreendimento como também nos gastos para a destinação final dos resíduos orgânicos gerados pelo condomínio.

Em cálculos preliminares, concluiu-se que o investimento se pagaria em apenas 8 meses, gerando uma receita mensal de aproximadamente R\$ 5.800,00 a partir do 9 mês de utilização da usina de incineração.



## 7. REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Disponível em: [www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=550](http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=550)>. Acesso em: 11 maio 2015.

ANEEL, 2002. “Atlas de energia elétrica no Brasil”. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro\\_atlas.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf)>. Acesso em: 04 de maio 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

BONTOUX, L. The Incineration of Waste in Europe: Issues and Perspectives. European Commission Joint Research Centre, 1999.

BRASIL. (2002). Lei 10.438 de 26/04/2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis nº. 9.427, de 26 de dezembro de 1996, nº. 9.648, de 27 de maio de 1998, nº. 3.890-A, de 25 de abril de 1961, nº. 5.655, de 20 de maio de 1971, nº. 5.899, de 5 de julho de 1973, nº. 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências

BRASIL, Lei nº 12.305/2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605/98 e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, 2 de agosto de 2010.

BRASIL. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Norma Técnica DEN 06/08: Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS. 2008. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/Série Estudos de Energia/20081208\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/Série%20Estudos%20de%20Energia/20081208_1.pdf)>. Acesso em: 11 maio 2015.

BIOMedicina (2013). Os lipídeos nos alimentos. [home page na internet]. Disponível em: <<http://www.biomedicinabrasil.com/2013/05/os-lipideos-nos-alimentos.html#.VjprqLerRD8>>. Acesso em 01 de novembro de 2015.

BIZZO, W. A. Geração, Distribuição e Utilização de Vapor. Capítulo 2 – Combustíveis, Unicamp, 2012. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP2.pdf>>. Acesso em 04 de novembro de 2015.

CAXETA, D. M. Geração de energia elétrica a partir da incineração de lixo urbano: O caso de Campo Grande/MS. Monografia (Especialização) - Curso de Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

CASIAN, E. Recuperação de energia em processos de incineração de resíduos. Dissertação (Mestrado). Universidade de Aveiro, 2013.

CEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente nº 71/2009. Estabelece a exigência e os critérios na solicitação e emissão de Autorizações Ambientais para co-processamento de resíduos em fornos de cimento, com fins de substituição de matéria prima ou aproveitamento energético. Curitiba, 2009.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 03/90. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Brasília, 1990.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 05/89. Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar - PRONAR. Brasília, 1989.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 264/99. Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividade de co-processamento de resíduos. Brasília, 1999.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 316/02. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistema de tratamento térmico de resíduos. Brasília, 2002.

Companhia Paranaense de Energia – COPEL. Taxas e Tarifas. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Ftarifas%2Fpagcopel2.nsf%2Fverdocatual%2F23BF37E67261209C03257488005939EB>>. Acesso em 02 de novembro de 2015.

DEMPSEY, C. R.; OPPELT, E. T. Incineração de resíduos perigosos: uma revisão crítica atual. Traduzido por Milton Norio Sogobe. São Paulo: CETESB/EET, 1987.

DORNBURG, V.; FAAIJ, A.P.C. Efficiency and economy of wood-fired biomass energy systems in relation to scale regarding heat and power generation using combustion and gasification technology. Biomass Bioenergy, 2001.

DRESCHER, U.; BRUGGEMANN, D., Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plant. Elsevier. 2006

EPA, U. S. E. P. A. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants: Proposed Standards for Hazardous Air Pollutants for Hazardous Waste Combustors (Phase I Final Replacement Standards and Phase II); Proposed Rule. Washington, 2004.

EPE (2012). Empresa de Pesquisa energética – EPE. Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2013 à 2022). Série Estudos da Demanda Nota Técnica DEA 22/12. Rio de Janeiro.

EPE (2013). Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2013 – Ano base 2012: Relatório Síntese Rio de Janeiro.

FAUSTO, M. A.; ANSALONI, J. A.; SILVA, M. E.; JÚNIOR, J. G.; DEHN, A. A.; CÉSAR, T. B. Determinação do perfil do usuário e da composição química nutricional da alimentação oferecida no restaurante universitário da Universidade Estadual Paulista, Araraquara, Brasil. Campinas, 2001.

FONSECA, Y. D.; BRUNI, A. L. Técnicas de avaliação de investimentos: uma breve revisão da literatura. 2013.

GOUVEIA, N. Análise espacial dos riscos à saúde associados à incineração de resíduos sólidos: avaliação preliminar. Revista Brasileira de Epidemiologia, 2010.

GRIMBERG, E. A. Política Nacional de Resíduos Sólidos: A responsabilidade das empresas e a inclusão social, 2004.

GRIPP, W. G. Aspectos técnicos e ambientais da incineração de resíduos sólidos urbanos: considerações sobre a proposta para São Paulo. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

GUSMÃO, M. V.; PIRES, S. H.; GIANNINI, M. O Programa de Eletrificação Rural “Luz no Campo”: Resultados Iniciais. Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas, 2002.

HENRIQUES, R. M.; MARTINS, B. O.; OLIVEIRA, A. C. Geração de Energia com Resíduos Sólidos Urbanos Análise Custo Benefício, 2004.

HERIQUES, R. M. Aproveitamento energético dos resíduos urbanos: Uma abordagem tecnológica. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/>>. Acesso em: 08 maio 2015.

IEA (1997) “Appendix k waste incineration” Renewables in Power Generation: Towards a Better Environment.

IPEA (2009) – Instituto de pesquisa econômica aplicada. Disponível em: <[http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009\\_relatorio\\_residuos\\_solidos\\_urbanos.pdf](http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf)>. Acesso em 04 de novembro de 2015.

IPT (1998). Lixo Municipal – Manual de Gerenciamento Integrado – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. p.227. São Paulo.

LIMA, L. M. Q. Tratamento de lixo. São Paulo: Hemus Editora Ltda. 1985

LINDEMEYER, R. M. Análise da viabilidade econômico-financeira do uso do biogás como fonte de energia elétrica. TCC (Graduação) - Curso de Administração, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

LOGAN, E. Thermodynamics Processes and Applications. Marcel Dekker, Inc, 1999.

MACHADO, C. F. Incineração: Uma análise do tratamento térmico dos resíduos sólidos de Bauru/SP. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MAVROPOULOS, A. “Thermal treatment in transition countries. Is there any future and how?” Seminário Internacional de Tecnologias e Gestão de Resíduos Sólidos, Rio de Janeiro, 2010.

MAMEDES, J. A.; RODRIGUES, M. P. J.; VANISSANG, C. A. Biomassa no Brasil. Bolsista de Valor: Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobrás e IF Fluminense, Campos dos Goytacazes/ RJ, v. 1, p.65-73, 2010.

MANDARINO, A. S. B. Gestão de resíduos sólidos domiciliares: Legislação e práticas no Distrito Federal. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável, área de concentração Gestão e Política Ambiental) - Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

MARANHO, A. S. Potencial de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos para Bauru e região. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.

MATTOS, T. F. L. Diagnóstico dos Resíduos Poliméricos presentes nos resíduos sólidos domiciliares gerados em São Carlos, 2005.

MENEZES, R. A. A.; GERLACH, J. L.; MENEZES, M. A. Estágio atual da incineração no Brasil. ABLP – Associação Brasileira de Limpeza Pública. VII SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E LIMPEZA, 2000.

NOVICKI, J. M.; MARTINEZ, R. Leds para iluminação pública. 2008.

PLASTIVIDA; ABRELPE. “Recuperação Energética, Resíduos Sólidos Urbanos”. Caderno Informativo. Plastivida – Instituto Sócio-ambiental dos plásticos. ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2012.

RGNutri (2015). Óleos vegetais. [home page na internet]. Disponível em: <<http://www.rgnutri.com.br/sqv/curiosidades/ove.php>>. Acesso em 01 de novembro de 2015.

RIBEIRO, S. G. Geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos – Usinas “Waste-to-Energy” (WTE), 2010. Disponível em: <[http://www.wtert.com.br/home2010/arquivo/publicacoes/usinas\\_lixo\\_energia\\_no\\_brasill.pdf](http://www.wtert.com.br/home2010/arquivo/publicacoes/usinas_lixo_energia_no_brasill.pdf)>. Acesso em 04 de novembro de 2015.

ROSA, L. P. Geração hidrelétrica, termelétrica e nuclear. Estudos Avançados, 2007.

RODRIGUES, F. L.; CAVINATTO, V. M. Lixo. Editora Moderna, 2001.

SALSA, N. S. Caracterização física dos resíduos sólidos domiciliares em diferentes formas de habitação. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2013.

SEMA – Secretaria Estadual de Meio Ambiente nº 54/06. Define critérios para Controle da Qualidade do Ar como um dos instrumentos básicos para gestão ambiental para proteção da saúde e bem estar da população e melhoria da qualidade da vida. Curitiba, 2006.

SILVA, A. T. O. S. Análise termodinâmica de uma central de biomassa lenhosa. Dissertação. Universidade Nova Lisboa, Portugal. 2013.

SILVA, E. R. S.; JUNIOR, N. V.; TONELLI, J. T. C. L.; MARTINS, G. Estimativa do potencial de conversão energética de resíduos sólidos urbanos através do processo de incineração. *Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente*. 2014.

SHAPIRO, H.; MORAN, M.; MUNSON, B.; DEWITT, D. Introdução à engenharia de sistemas térmicos: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

SHIPLEY, A. M.; ELLIOT, R.N. Stationary Fuel Cells: Future Promise, Current Hype, 2008. Disponível em: <http://www.aceee.org/pubs/ie041full.pdf>. Acesso em 13 maio 2015.

THEMELIS, N. J. “An overview of the global waste-to-energy industry in Waste Management World”, 2003. Disponível em: [http://www.seas.columbia.edu/earth/papers/global\\_waste\\_to\\_energy.html](http://www.seas.columbia.edu/earth/papers/global_waste_to_energy.html), Acesso em: 12 maio 2015.

TOLMASQUIM, M. T. Fontes Renováveis de Energia no Brasil. Rio de Janeiro, Interciência, 2003.

USINAVERDE, 2014. Disponível em: <<http://www.usinaverde.com.br>>. Acesso em 29 de outubro de 2015.

VAN CANEGHEM, J.; BREMS, A.; LIEVENS, P.; BLOCK, C. Fluidized bed waste incinerators: Design, operational and environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*. Heverlee, Bélgica, 2012.

World Health Organization (WHO). Population health and waste management: scientific data and policy options, 2007.

YIN, C.; ROSENDAHL, L.; KAER, S. 2008. “Grate-firing of biomass for heat and power production”. *Progress in Energy and Combustion Science*. Institute of Energy Technology, Dinamarca, 2008.

ZANATTA, F. L. Desenvolvimento e avaliação de um gaseificador de biomassa e estudo do potencial de produção de biogás com resíduos agrícolas e da avicultura. Dissertação (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2011.

ZANIN, T. (2014). Disponível em: <<http://www.tuasaude.com/tatiana-zanin/>>. Acesso em 01 de novembro de 2015.

ZANIN, T. (2015). Disponível em: <<http://www.tuasaude.com/tatiana-zanin/>>. Acesso em 01 de novembro de 2015.

\_\_\_\_\_. Decreto nº 769/2009. Regulamenta a gestão dos resíduos orgânicos e rejeitos de responsabilidade pública e privada no Município de Londrina e dá outras providências. *Jornal Oficial*. Londrina, 29 de setembro 2009.