

PROJETO DE GRADUAÇÃO
VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA
DE USINAS "WASTE-TO-ENERGY"

Por,

Yanne Cardoso Troccoli de Nogueira 090135890

Brasília, 09 de dezembro de 2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA
DE USINAS "WASTE-TO-ENERGY"**

POR,

Yanne Cardoso Troccoli de Nogueira 090135890

Banca Examinadora

Profa. Dianne Magalhães, UnB/ ENM

Profa. Adelaida P. Fonseca, UnB/ ENC

Profa. Andrea Santos, UnB/ EPR

Prof. Mario O. M. de Carvalho, UnB/ ENM

Brasília, 09 de dezembro de 2015

*A meus pais, Elizabete e Carlos, meu
irmão Yuri e aos caçulas. Aos meus avós.
Ao meu Xu e à minha Carolinda.*

AGRADECIMENTOS

A gratidão jamais poderia ser transcrita em uma folha de papel e nem poderia alcançar a todos aqueles que eu gostaria de agradecer por diretamente ou indiretamente serem responsáveis pela minha graduação em Engenharia Mecânica.

Mas, né?! Vou me esforçar. Vou começar agradecendo àqueles que foram responsáveis pela minha educação e criação, meus pais, apesar de separados sempre estiveram presentes em todas as etapas da minha vida e sei que se eles não tivessem sido exatamente como foram para mim eu não seria quem sou hoje. Também ao meu irmão que sempre me incentivou e foi meu grande exemplo.

Agradeço ao meu namorado, Matheus Junqueira, por ter me ajudado em todas as etapas do curso e por ter sido sempre meu modelo de engenheiro e estudante. Obrigada por ter me suportado em momentos complicados do curso,

Agradeço às minhas amigas, que são minhas irmãs, sem vocês certamente não conseguiria estar feliz cursando engenharia. Um agradecimento especial à Carolina Scartezini, minha grande amiga que foi uma das responsáveis por eu ter ingressado em uma Universidade Federal e que é meu exemplo de vida e de amor. Outros agradecimentos aos grupos de amigos e amigas formados ao longo do ensino fundamental e médio e do cursinho, em particular à Galera Bala e às forrozeiras do Dinatos. Grazie anche a tutti quelli amici che ho fatto in Italia che ormai mi hanno aiutato con la mia laurea, in speciale a Claudia, la mia angela a Napoli. Não poderia me esquecer dos novos amigos que fiz na UnB depois que voltei do intercâmbio. E também àqueles que entraram junto comigo no 2º/2009.

Um agradecimento aos que me fizeram fazer as escolhas mais importantes para o meu futuro na engenharia, o pessoal da TECMEC e ao meu Diretor e tutor da vida profissional, Rooney Puntel. E aos meus grandes incentivadores que torciam todos os dias por mim, meu papai, pelo apoio incondicional, aos meus avós, e semi-vó Rosa Nogueira, Regina Aparecida e meu anjo da guarda.

E claro, agradecimento a todo apoio da COBRAPAR e do corpo docente da UnB.

Este trabalho tem por finalidade apresentar a análise de viabilidade técnica e econômica de dois cenários distintos para a utilização de Usinas Waste to Energy a fim de incentivar a utilização do Lixo como fonte de energia alternativa.

A produção de lixo é inerente ao crescimento da população e sua aglomeração em vilas, cidades ou metrópoles. O lixo é um fator de risco para os seres vivos quando não tratado e depositado em locais inapropriados, tanto pela proliferação de doenças quanto pela degradação do meio ambiente.

No Brasil, principalmente em pequenos municípios, não existe a preocupação em depositar os resíduos urbanos em locais apropriados, uma vez que o cidadão não tem o hábito de pagar uma tarifa de destinação final do lixo; seja pelo excesso de espaço disponível no Brasil, seja pela não conscientização por parte dessa população, o governo, então, não tem recursos o suficiente para investir nesse tema.

Este estudo apresenta o panorama nacional de como o Resíduo Sólido Urbano (RSU) é tratado ou não tratado, mostrando as oportunidades de aproveitamento energético deste RSU. De forma indireta através da reciclagem, ou diretamente através de processamento biológico (compostagem) ou de tratamento térmico (gaseificação ou incineração).

Neste trabalho avalia-se, a partir de tecnologias já dominadas na Europa, qual a melhor maneira de aproveitar energeticamente o RSU. Para isto, foi feito um estudo dos equipamentos de transformação do RSU em Combustível e de Reaproveitamento Térmico deste. Depois, foi feita a análise de viabilidade de dois possíveis cenários, onde basicamente o que se variou foi a quantidade do lixo recebido pela coleta.

ABSTRACT

This study presents a methodology for economic feasibility studies of the applicability of two different scenarios using waste to run Waste to Energy power plants aiming to promote waste as an alternative energy source.

The production of waste is inherent to the populational growth and it's agglomeration in villages, cities and metropolises. Trash is a risk factor for all living beings when untreated or inappropriately deposited because of its disease spreading and environmental degradation potential.

In Brazil, mainly in small towns, there is no concern in appropriately depositing urban residue, seeing that it would represent an extra expense to the municipalities and that the average citizen is not used to paying taxes for the trash final destination. Therefore, either because of the country's size, which creates the notion that there is much land to waste, or because of the population's lack of awareness, the government does not have enough resources to invest in this matter.

This study presents the Municipal Solid Waste (MSW) treatment national panorama, showing the MSW's energetic use opportunities: indirectly through recycling, or directly through either biological processing (composting) or thermal recovery (gasification or incineration).

Based on solid technologies used in Europe, this work evaluates the best manner to use energetically the MSW. With this goal, a study about the equipment involved in the transformation of the MSW in fuel, as well as it's own thermal use. Then, a viability analysis was conducted for two possible scenarios where the amount of trash intake per run was the variable.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	- 13 -
1.1	MOTIVAÇÃO	- 13 -
1.2	PANORAMA NO DF E NO BRASIL.....	- 13 -
1.3	DEMANDA ENERGÉTICA E OPORTUNIDADES PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO	- 14 -
1.4	DESCRIÇÃO DA PROBLEMÁTICA	- 16 -
1.5	ANÁLISE ECONOMICA.....	- 18 -
1.6	OBJETIVO.....	- 21 -
1.7	METODOLOGIA	- 21 -
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	- 22 -
2.1	O RESÍDUO SÓLIDO URBANO (RSU).....	- 22 -
2.1.1	CLASSIFICAÇÃO	- 22 -
2.1.2	COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	- 23 -
2.2	DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	- 26 -
2.3	COMBUSTIVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR).....	- 28 -
3	APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	- 32 -
3.1	TRATAMENTOS TÉRMICOS	- 32 -
3.1.1	INCINERAÇÃO	- 32 -
3.1.2	GASEIFICAÇÃO	- 35 -
3.2	TRATAMENTO BIOLÓGICO	- 40 -
3.2.1	DIGESTÃO ANAERÓBIA (DA).....	- 41 -
4	PLANTA DE GERAÇÃO DE ENERGIA.....	- 43 -
4.1	GERAÇÃO DE ENERGIA COM O RSU	- 43 -
4.2	ETAPAS PARA A ESCOLHA DAS TECNOLOGIAS PARA A PLANTA DE PROCESSAMENTO DE CDR	- 43 -
4.2.1	EQUIPAMENTOS DA PLANTA DE CDR	- 47 -
4.3	MATERIAIS NÃO TRANSFORMADOS EM COMBUSTÍVEL.....	- 50 -
4.3.1	MATERIAIS RECICLÁVEIS	- 50 -
4.3.2	CINZAS	- 51 -
4.3.3	DESTINAÇÃO FINAL PARA RESÍDUOS NÃO PROCESSADOS	- 51 -
5	CENÁRIOS	- 52 -
6	VIABILIDADE TECNICO ECONOMICA	- 56 -
6.1	DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA	- 58 -
6.1.1	DEFINIÇÃO DE VIDA ÚTIL EFETIVA	- 59 -
6.1.2	INVESTIMENTO INICIAL	- 60 -
6.1.3	CUSTO ANUAL DO INSUMO ENERGÉTICO – CC	- 62 -

6.1.4	CUSTO ANUAL DE MANUTENÇÃO - CM	- 63 -
6.1.5	VALOR ANUAL DO SUBPRODUTO – VS	- 64 -
6.1.6	VALOR ANUAL DE DESTINAÇÃO E CUSTO DE SEGURO	- 68 -
6.1.7	VALOR RESIDUAL R	- 70 -
6.1.8	PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA.....	- 70 -
6.1.9	CUSTO DISTRIBUÍDO TOTAL CD_{Total}	- 71 -
6.1.10	TEMPO DE RECUPERAÇÃO DO INVESTIMENTO.....	- 71 -
6.1.11	AVALIAÇÃO CUSTO/BENEFÍCIO.....	- 72 -
6.2	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	- 73 -
7	CONCLUSÕES.....	- 79 -
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	- 81 -

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aterro Sanitário	- 27 -
Figura 2 - Estocagem de CDR a céu aberto	- 29 -
Figura 3 - Planta típica de incinerador com grades móveis	- 34 -
Figura 4 - Representação de um Gaseificador	- 36 -
Figura 5 - Etapas para Instalação de Linha de CDR	- 45 -
Figura 6 - Fluxograma do Processo de Pré-triagem dos Resíduos	- 46 -
Figura 7 - Separador de Não ferrosos	- 48 -
Figura 8 - Redução de Tamanho - a. Shredder, b. Triturador Simples, c. Triturador Eixo Simples d. Triturador quadruplo.	- 49 -
Figura 9 - Relação entre o raio da pilha e a temperatura crítica	- 50 -
Figura 10 - Descrição do Cenário	- 52 -
Figura 11 - Fluxo de Caixa de um Empreendimento Energético Genérico	- 59 -
Figura 12 - Fluxo de Caixa - Cenário 1	- 69 -
Figura 13 - Fluxo de Caixa - Cenário 2	- 70 -
Figura 14 – Gráfico da Análise de Sensibilidade do Custo/Benefício da Planta de Geração de Energia em relação aos seus Custos de Manutenção	- 74 -
Figura 15 – Gráfico da Análise de Sensibilidade do Custo/Benefício da Planta de Geração de Energia em relação ao Poder Calorífico Inferior dos Resíduos	- 75 -
Figura 16 – Gráfico da Análise de Sensibilidade do Custo/Benefício da Planta de Geração de Energia em relação ao Fator de Capacidade da Planta	- 76 -
Figura 17 - Gráfico do Tempo de Retorno do Investimento em Relação a variação do Valor da Venda de Energia	- 77 -
Figura 18 - Gráfico do Tempo de Retorno do Investimento em Relação a variação da Tarifa de Destinação Final	- 78 -

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução do Consumo Final de Energia no Brasil ¹ (milhares de TEPs)	15 -
Tabela 2 - Poder Calorífico de Materiais Encontrados em RSU	25 -
Tabela 3 - Comparação entre Gaseificação e Incineração	39 -
Tabela 4 - Processo de Separação de Fluxos	49 -
Tabela 5 - Cenários	53 -
Tabela 6 - Investimento Inicial Cenário 1.....	61 -
Tabela 7 - Investimento Inicial Cenário 2.....	62 -
Tabela 8 - Custo do Combustível por Ano	63 -
Tabela 9 - Custo de Manutenção	64 -
Tabela 10 - Composição Gravimétrica Nacional	65 -
Tabela 11 - Custos e Receitas do Subproduto	66 -
Tabela 12 - Análise estatística do custo de implantação de Aterro Sanitário	67 -
Tabela 13 - Disposição de RSU – Aterro Sanitário do Vale de Aço	67 -
Tabela 14 - Estimativas de Disposição de RSU – Aterro Sanitário do Vale de Aço.....	68 -
Tabela 15 - Valores para o Fluxo de Caixa - Cenário 1.....	69 -
Tabela 16 - Valores para o Fluxo de Caixa - Cenário 2.....	70 -
Tabela 17 - Tempo de Recuperação de Investimento	72 -
Tabela 18 - Dados dos Cenários	73 -
Tabela 19 - Custo Médio de Geração	73 -

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Gregos

η Eficiência

Siglas

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CC	Custo do Insumo Energético
CDR	Combustível Derivado de Resíduos
CDTotal	Custo Distribuído Total
CE	Custo do Equipamento
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CI	Custo de Instalação
CM	Custo de Manutenção e Operação
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
DA	Digestão anaeróbia
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ISWA	International Solid Waste Association
O&M	Operação e Manutenção
PCI	Poder Calorífico Inferior
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PIB	Produto Interno Bruto
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
R	Valor Residual do Investimento ao fim da vida útil da instalação
RPM	Rotações por minuto
RSMs	Resíduos Sólidos Mistos
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SIN	Sistema Interligado Nacional
tc	Tempo de Construção
TDF	Tarifa de Destinação Final
TEP	Toneladas Equivalente de Petróleo
UTE	Usina Termoelétrica
V	Vida Útil da Instalação
VS	Valor do Subproduto
WTE	Waste to Energy

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A crescente geração de resíduos causada pelo aumento do consumo de toda a população está entre a os maiores problemas ambientais da atualidade no país. Com a expansão e contínuo aumento vertical das zonas urbanas os problemas se agravam, tendo em vista que a infraestrutura sanitária brasileira não acompanha necessariamente este acréscimo populacional.

De acordo com o IBGE (2002) o sistema de limpeza urbana coletava cerca de 150 mil toneladas dia de resíduos em 2001. O mesmo estudo foi realizado no ano de 1989 onde constou que cerca de 100 mil toneladas de lixo eram geradas por dia. A observação desse aumento na produção de lixo diário produzido pela sociedade, trouxe à tona um dado alarmante em relação a outro estudo realizado pelo IBGE: Enquanto em um período aproximado de 10 anos o aumento de lixo foi de aproximadamente 54%, o crescimento populacional neste mesmo período aumentou apenas 15,6%.

Também o crescimento tecnológico nas áreas de conhecimento que tratam sobre uma destinação adequada ao Resíduo Sólido Urbano, RSU, não acompanha e nem acompanhou o percentual de aumento de criação de resíduos. Grande parte dos resíduos gerados no país não é regularmente coletada, permanecendo junto às habitações (principalmente nas áreas de baixa renda) ou sendo vazadas em logradouros públicos, terrenos baldios, encostas e cursos d'água (MONTEIRO, 2001).

A problemática dessa geração crescente e desenfreada de resíduos resultantes de sociedades caracterizadas pelo consumo predatório dos recursos naturais preocupa a maior parte dos países devido aos inerentes impactos ambientais negativos associados à acumulação de lixo. Sendo assim, uma solução que possa ser definitiva em relação à acumulação de resíduos se torna indispensável para as cidades e municípios.

1.2 PANORAMA NO DF E NO BRASIL

Considerando dados de IBGE (2002), dos 5.507 municípios brasileiros, 4.026, ou seja, 73,1% tinham população de até 20.000 habitantes. Nestes pequenos municípios, 68,5% dos resíduos gerados eram vazados em lixões e em alagados. Entretanto, se tomarmos como referência a quantidade de lixo por eles gerada, em relação ao total da produção brasileira, a situação se apresenta como menos grave, pois em conjunto correspondiam a somente 12,8% do total brasileiro (20.658 t/dia). Este valor era inferior ao gerado pelas 13 maiores cidades brasileiras, com população acima de um milhão de habitantes, que coletavam 31,9 % (51 635 t/dia) de todo o lixo urbano brasileiro, e tinham seus locais de disposição final em melhor situação: apenas 1,8 % (832 t/dia) era destinado a lixões, o restante era depositado em aterros controlados ou sanitários (IBGE, 2000).

O panorama das principais capitais do país não é animador. Há estimativas que apontam para a existência de 12.000 lixões a céu aberto espalhados pelo País. A cidade de São Paulo, porém é um bom exemplo, com 11.253.503 habitantes em 2011 e 642 Municípios, produz 39.072,01 toneladas de lixo por dia, conforme o Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares realizado pela CETESB (CETESB 2014). No total 97,8% desse total são dispostos em sistemas adequados do ponto de vista ambiental e sanitário.

Outro problema enfrentado nas análises sobre os resíduos gerados no Brasil é que a obtenção de dados em relação à sua composição é de difícil obtenção, tanto pela origem da fonte, quanto pela pouca quantidade de estudos elaborados nessa área. Por exemplo, segundo a Prefeitura de Belo Horizonte, o lixo doméstico produzido naquele Município é composto por 65% de matéria orgânica, 27% de material reciclável (papel, vidro, metal, plástico e resíduos da construção civil) e 8% de resíduos não recicláveis, incluindo os provenientes das unidades de serviços de saúde. Embora a cidade possua um programa de coleta seletiva e reciclagem, não há informações sobre suas respectivas quantidades.

Em Porto Alegre, foram colhidos mensalmente 20 mil toneladas de resíduos. A coleta seletiva recolhia cerca de 60 toneladas por dia. A meta era atingir 100 toneladas/dia até o final do ano 2000, no entanto, dados comprobatórios da consecução desta expectativa não foram encontrados. Curitiba é outro exemplo de capital que possui programa de coleta seletiva, mas não existem dados oficiais sobre a quantidade de lixo recolhido dessa forma. (JURAS 2000).

Tendo em vista o panorama de resíduos no Brasil e sua destinação final, muitas vezes, inapropriada, vê-se a urgência da resolução de problemas quanto a sua utilização devida. O aproveitamento do RSU como insumo energético mostra-se uma solução apropriada para esta problemática. Seu uso, além de diferenciar a matriz energética localmente, tornando municípios mais independentes, também colabora com a redução de construção de novos aterros sanitários, por exemplo.

1.3 DEMANDA ENERGÉTICA E OPORTUNIDADES PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

A demanda energética de um país está fortemente correlacionada com sua atividade econômica, ou seja, o Produto Interno Bruto. A medida desta correlação é dada através da intensidade energética do país (BRONZATTI, 2008). Hoje, o petróleo ainda predomina na matriz energética com 41% de participação e a eletricidade é a segunda forma mais utilizada, com 19%. Porém, com a inserção do etanol na matriz energética, através da adição à gasolina e mais recentemente com a popularização dos veículos flexfuel, a cana-de-açúcar representa 12% de participação na matriz energética nacional. Na Tabela 1, detalha-se a evolução do consumo final de Energia do Brasil em milhares de TEPs (toneladas equivalente de petróleo).

Tabela 1 - Evolução do Consumo Final de Energia no Brasil (milhares de TEPs)

	1970	1980	1990	2005	Δ% ao ano 1970-2005
Derivados do petróleo	21.040	44.770	44.944	66.875	3,4
Elettricidade	3.231	10.189	18.123	31.103	6,7
Produtos da cana ²	3.158	6.221	10.414	20.046	5,4
Lenha	28.345	21.862	15.636	16.119	- 2,9 ³
Gás natural	3	320	1.385	9.411	14,5 ⁴
Outros ⁵	3.306	9.506	15.038	21.490	5,5
TOTAL	59.083	92.868	105.540	165.044	3,0

1/ Elaborado com base no Balanço Energético Nacional (MME/EPE, 2006).

2/ Inclui etanol.

3/ Taxa no período 1970-1990.

4/ Taxa no período 1980-2005.

5/ Outros: inclui carvão mineral (6,0% do consumo final em 2005).

Fonte: Brasil, Ministério de Minas e Energia: Matriz Energética Nacional 2008.

Além disso, a participação de fontes renováveis na capacidade instalada de geração elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) possui perspectiva de crescimento: dos 83,8% previstos em 2012 para 85,8% em 2022. Tal aumento ocorrerá principalmente devido à expansão da participação do parque eólico, que saiu de 1,5% no final de 2012 para 9,5% em 2022 (Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2022). Porém, não há nenhum tipo de previsão para o crescimento de geração de energia com o lixo, a não ser com biomassa (derivados recentes de organismos vivos utilizados como combustíveis). Esse fato se justifica pelo recente surgimento da tecnologia no Brasil.

A crise hídrica sofrida no Brasil no início do ano de 2015 apenas acentuou uma conhecida fragilidade do sistema de abastecimento energético do Brasil. Durante a década de 80 o consumo de eletricidade cresceu uma vez e meia mais depressa que nosso produto interno bruto (PIB). Na década seguinte o crescimento do consumo disparou na frente do PIB: foi quase duas vezes e meia mais rápido. Nosso consumo de eletricidade vem também aumentando mais rapidamente que nossa capacidade de geração nessas últimas décadas (JANNUZZI, 2015), por isso a importância de uma nova fonte de energia que não dependa de meteorologia ou de políticas públicas e que ainda possua, por muitos anos, matéria-prima disponível e renovável.

O aproveitamento energético de RSU, desde que utilize rotas tecnológicas apropriadas e devidamente analisadas quanto aos riscos de implementação, é uma alternativa ambientalmente correta de tratamento desses resíduos, além de ser uma oportunidade de negócios. A viabilidade econômica depende, além do balanço entre receitas e despesas, de um adequado contrato de concessão com uma prefeitura para garantia na obtenção desses resíduos e da definição da taxa de destinação final a ser paga por esta prefeitura.

Conforme o Decreto Federal de nº 7404 de 23 de dezembro de 2010, que regulamenta a PNRS, a recuperação energética dos resíduos deverá ser ainda disciplinada em ato conjunto dos Ministérios do Meio Ambiente, de Minas e Energia e das Cidades, exceto quanto ao aproveitamento energético dos

gases gerados na biodigestão e na decomposição da matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários.

Como instrumentos econômicos da Política Nacional estão previstas várias medidas indutoras ao aproveitamento energético de resíduos, dentre elas:

- Incentivos fiscais, financeiros e creditícios;
- Concessão de terrenos públicos;
- Subvenções econômicas;
- Fixação de critérios, metas e outros dispositivos complementares de sustentabilidade ambiental para as aquisições e contratações públicas;
- Apoio à elaboração de projetos no âmbito do mecanismo de desenvolvimento limpo - mdl ou quaisquer outros mecanismos decorrentes da convenção quadro de mudança do clima das nações unidas.

A produção de energia elétrica a partir de RSU apresenta duas características importantes, de acordo com a CTEneg:

1. Exige coleta e transporte para concentrar os RSU, pois o conteúdo energético por unidade de volume é baixo;
2. As tecnologias de conversão apresentam forte economia de escala (o investimento por unidade de insumo cai e as eficiências de conversão aumentam com a capacidade).

Segundo levantamento do IPEA, em 2008, o custo médio de disposição final de resíduos sólidos urbanos em aterros foi de R\$ 40,37/t de resíduos aterrados, sendo R\$ 43,60/t o valor cobrado por empresas privadas, R\$ 20,02/t pela Prefeitura e R\$ 46,16/t por consórcios públicos. Valor esse inferior aos praticados por outras tecnologias de tratamento, o que pode inviabilizar a instalação de novas tecnologias, além de dificultar a remuneração do investimento e a cobertura dos custos de operação e manutenção dessas instalações, como disposto no PNRS.

1.4 DESCRIÇÃO DA PROBLEMÁTICA

Atualmente o fluxo de materiais da economia ainda segue, majoritariamente, um caminho linear: extração da natureza – produção de um bem – uso do bem – descarte do bem. Como os recursos naturais e o espaço disponível para depositá-los são limitados é necessário abandonar este caminho linear e seguir um caminho circular dos materiais (STRAUCH, 2008). Dessa forma, os resíduos devem ser reduzidos, através da diminuição no consumo e reutilização de matéria-prima, ou reaproveitados de forma a reutilizar a energia contida neles. O foco desse estudo será no aproveitamento energético desses resíduos.

O aproveitamento energético de RSU pode ser feito de forma indireta através da reciclagem, ou diretamente através de processamento biológico (compostagem) ou de tratamento térmico (gaseificação ou incineração). Ao permitir a substituição de insumos (vidro, plástico, borracha, metais, etc.) e reduzir a demanda por extração de matérias-primas na natureza, a reciclagem se constitui como uma forma ambientalmente correta de aproveitamento energético, mas não necessariamente eficiente.

No caso da compostagem, micro-organismos realizam a fermentação anaeróbica da parcela orgânica dos resíduos, resultando na conversão dessa parcela em adubo e na produção de metano, na qual a sua queima permite a geração de energia. Já no tratamento térmico, a energia é gerada por meio da queima completa ou incompleta, dependendo da forma de incineração dos resíduos (SOUSA; GAIA; RANGEL, 2010; EPE, 2008). E na gaseificação, a energia é obtida por meio de elementos, basicamente hidrocarbonetos sólidos, que são craqueados (queima parcial) e transformados em Syngas – gás de síntese, insumo da usina térmica.

De modo geral considera-se que os processos biológicos oferecem menores riscos ao meio ambiente, porém faz-se necessária uma análise prévia da composição dos RSU para a definição do processo mais adequado (SOUSA; GAIA; RANGEL, 2010; WBG, 2012). Ademais, o aproveitamento energético dos resíduos sólidos é uma fonte geradora de créditos de carbono, uma vez que possibilita a redução das emissões de metano na atmosfera ao mesmo tempo em que possibilita a redução do uso de fontes fósseis para a produção de energia, como o gás natural e o carvão mineral (EPE, 2008).

Para tal, a problemática é conseguir gerar energia com os resíduos, de forma a obter um processo sustentável, limpo e eficiente. Será necessário um diagnóstico rigoroso da qualidade do RSU para garantir que o processo seja precisamente definido, implantando uma usina que consiga separar materiais perigosos e inertes e assim gerar energia.

Numa análise ideal, para que esse processo seja eficiente e viável a quantidade e a qualidade do RSU devem ser medidos e estudados (POLAZ & TEIXEIRA, 2009). Para o sucesso de qualquer programa de gerenciamento de resíduos é fundamental, portanto, conhecer detalhadamente o que se gera para planejar todo o sistema de gestão. Porém, na falta de dados sobre a quantificação e qualidade do RSU gerado, a análise feita neste estudo é superficial. Apesar de valores financeiros reais de investimentos.

Visando mitigar o erro por aproximações duvidosas a referida análise feita se baseia em dois cenários que podem ser implementados em municípios de médio porte¹ – Cenário 1, ou cidades – Cenário 2.

Para aprofundamento, um planejamento deve ser realizado iniciando-se pela classificação e quantificação dos resíduos gerados, ou seja, é necessário inicialmente estimar a quantidade total e por habitante; realizar a análise da composição gravimétrica ou composição física (percentual de cada componente em relação ao peso total dos resíduos) e calcular o peso específico (peso dos resíduos em função do volume por eles ocupado) (REZENDE, 2013). Com esses dados em mãos, é possível então avaliar qual seria a melhor tecnologia de destinação final do lixo.

Finalizada a classificação é possível, então, iniciar os estudos de métodos e plantas disponíveis no mercado, ou em fase de pesquisa, para dar uma destinação adequada aos resíduos. Atualmente, no mundo, existem várias possibilidades de tratamento desses resíduos. No Brasil as tecnologias de tratamento de RSU para geração de CDR, gaseificação, plasma e incineração estão atrasadas em relação ao contexto mundial, mas estão em crescimento acelerado, tendo em vista que as tarifas para energia e incentivos fiscais estão altas e estimulantes para os empreiteiros.

Visando solucionar tal problemática esse estudo foi considerado um arranjo de usina WTE. A planta, então, deverá conter três subplantas principais, a planta de processamento de RSU com produção de CDR, a planta térmica de geração de combustível gasoso e a planta de geração de energia com o combustível gasoso.

1.5 ANÁLISE ECONOMICA

A Análise Econômica de projetos de energia é de fundamental importância para o Planejamento Energético e para a tomada de decisões no setor energia (CARVALHO, 2006). Quanto mais nova a tecnologia, maior risco para o interessado no investimento dessa tecnologia. Por isso a necessidade de se fazer uma análise econômica de qualquer projeto. O estudo de viabilidade visa mitigar os riscos e comparar tecnologias ou processos, para então fazer a escolha da melhor opção de geração de energia, dependendo do contexto geográfico, político e ambiental.

A análise da viabilidade econômica de um empreendimento deve considerar o dinheiro investido no tempo. Para isso, surgiram diversos métodos ao longo dos anos. Existem várias metodologias para

¹ De acordo com dados populacionais do IBGE/2010, Municípios de Pequeno Porte 1 tem até 20.000 habitantes; Município de Pequeno Porte 2 tem de 20.001 até 50.000 habitantes; Município de Médio Porte tem de 50.001 até 100.000 habitantes e Município de Grande Porte tem de 100.001 até 900.000 habitantes.

se avaliar se um investimento é rentável ou não, e, principalmente, se é viável ou não. Segundo Leal (2012) existe quatro formas de se avaliar a rentabilidade de um projeto.

- a) A análise de Payback - Período de recuperação do investimento. Trata-se da mais antiga e simples metodologia para análise de projetos de investimentos e busca calcular o número de anos necessários para recuperar o investimento, feito por meio do fluxo de caixa estimado para o empreendimento. Por meio desta metodologia será possível identificar quando as receitas e despesas do projeto serão equivalentes. Dessa forma, busca-se determinar o tempo necessário para que o fluxo de caixa iguale o investimento inicial, ou seja, para que o investimento inicial seja recuperado. Para seu cálculo será preciso identificar o fluxo de caixa esperado ao longo dos anos do empreendimento, as expectativas de investimento e de retorno ano a ano e, por fim, identificar quando a soma dos retornos iguala ou supera o total do investimento.
- b) Taxa Interna de Retorno (TIR) consiste em um método para calcular a taxa de desconto que torna o valor presente das receitas igual ao valor presente das despesas, ou seja, o fluxo será igual a zero, não levando em conta a taxa de juros. Trata-se de um índice baseado apenas em fluxos de caixa de um projeto, que é a base do mercado interno, servindo para analisar a atratividade deste.
- c) Valor presente líquido é baseado no fluxo de caixa descontado. Consiste o VPL (Valor Presente Líquido) em um indicador que permite analisar a viabilidade econômica de determinado projeto em determinado período de tempo. Fácil de entender e utilizar, pois combina nossa compreensão intuitiva de dinheiro, já que provoca uma sensação intuitiva do significado do resultado. Nesse método, o VLP será definido pela soma do valor presente das receitas do projeto ao longo de sua vida útil trazido para a presente data, subtraído da soma das despesas previstas pela vida do empreendimento trazidas para a presente data, atualizada pela(s) taxa(s) de desconto.
- d) O custo distribuído da energia elétrica identifica o custo estimado para geração de energia elétrica, no caso, com o RSU.

Posteriormente será possível comparar com outras formas de geração ambientalmente limpa, possibilitando a tomada de decisão por parte de um empreendedor ou mesmo do poder público. Outra vantagem desse método consiste em utilizar apenas dados relativos às despesas do projeto, isso porque esses são mais previsíveis, como menor sujeição a fatores externos.

Ressalta-se a dificuldade de estimar o valor de venda da energia elétrica, pois a cada leilão de energia o valor é diferente, e por isso o risco de erro é alto. E por isso a importância de se estimar o valor do custo de geração da energia elétrica, neste caso com o RSU, pois assim será possível simplesmente compará-lo com os custos de geração de outras tecnologias, por exemplo eólica,

fotovoltaico e combustíveis fósseis, possibilitando a tomada de decisão. Essa metodologia parte da ideia básica de que qualquer forma de geração de energia elétrica possui um custo e que, com esse custo, é possível gerar determinada quantidade de energia. Por meio de um sistema simples de cálculo será possível identificar o custo estimado de energia.

Para essa pesquisa será utilizada uma metodologia desenvolvida por um professor dessa mesma universidade, Carvalho (2006). A metodologia é bastante flexível, permite ainda incorporar na análise, riscos e custos ambientais de maneira fácil, independentemente da vida útil do empreendimento considerado. É adequada para a Avaliação Econômica de Projetos de Energia que permita uma fácil comparação das alternativas consideradas. Os critérios de análise levam em consideração o investimento inicial, Valor atual Equivalente, tempo de recuperação do investimento inicial, taxa interna de retorno e o custo da energia produzida ao longo da vida útil da instalação, por ser tão completa foi escolhida como metodologia de análise.

1.6 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar e discutir a viabilidade técnica e econômica de um projeto de uma planta de geração de energia com o Resíduo Sólido Urbano.

Como objetivos específicos do trabalho, destacam-se:

1. Identificar o panorama político do resíduo sólido no Brasil, com enfoque em Brasília;
2. Identificar as tecnologias de aproveitamento energético de resíduo sólido;
3. Identificar o custo da energia produzida ao longo do processo;
4. Identificar a atratividade da Planta de geração de energia com o RSU em dois cenários distintos.

1.7 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos do projeto foi realizado um estudo teórico sobre as oportunidades dentro do contexto de geração de energia com o lixo, um estudo sobre o potencial calorífero dos resíduos e um estudo sobre as tecnologias de gerenciamento e geração de energia com Resíduos Sólidos Urbanos instaladas mundialmente. Como procedimento metodológico, inicialmente foi realizada uma coleta de dados documentais sobre a matriz energética, energias renováveis e alternativas no mundo e no Brasil. Em seguida, os dados foram analisados de forma progressiva em comparação às tecnologias de energias renováveis e alternativas disponíveis no Brasil. Processos térmicos de aproveitamento energético de Resíduos foram estudados até a escolha de um processo consolidado.

Finalmente, foi efetuada a elaboração de uma análise de viabilidade técnica e econômica para dois cenários distintos, que serão detalhados na seção 5, na qual foi utilizado como base de valores orçamentos gerados por empresas do ramo, para a de implantação da planta de processamento de geração de energia. Utilizou-se uma metodologia que avalia técnica economicamente a atratividade de um investimento em uma planta de geração de energia com o Resíduo Sólido Urbano, através dos indicadores: Investimentos iniciais, custo da energia produzida ao longo da vida útil da instalação, tempo de recuperação do investimento inicial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O RESÍDUO SÓLIDO URBANO (RSU)

A denominação Resíduo Sólido, *residuu*, do latim, significa o que sobra de determinadas substâncias, e a palavra sólido é incorporada para diferenciá-los de gases e líquidos. Urbano por sua vez advém da origem, no caso, origem urbana, cidades e municípios.

Segundo a NBR 10004/2004 os resíduos sólidos são aqueles:

“Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, hospitalar, agrícola, comercial, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou copos d’água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível”

Para Calderoni (1997), sob o ponto de vista econômico, resíduo ou lixo é todo material que uma dada sociedade ou agrupamento humano desperdiça. Isso pode decorrer de várias razões, como sejam, por exemplo, problemas ligados à disponibilidade de informação ou de meios para realizar o aproveitamento do produto descartado, inclusive da falta de um mercado para produtos recicláveis.

Segundo Lima (2015), deve se destacar a relatividade da característica inservível do lixo, pois aquilo que já não apresenta nenhuma serventia para quem o descarta, para outro pode se tornar matéria-prima para um novo produto ou processo. Nesse sentido, a ideia do reaproveitamento do lixo é um convite à reflexão do próprio conceito clássico de resíduos sólidos. É como se o lixo pudesse ser conceituado como tal somente quando da inexistência de mais alguém para reivindicar uma nova utilização dos elementos então descartados.

2.1.1 CLASSIFICAÇÃO

Existem diversas formas de se classificar um resíduo. De acordo com sua periculosidade (riscos potenciais de contaminação do meio ambiente), de acordo com sua natureza ou origem, de acordo com suas características físico-químicas e diversos outros. Neste estudo foi escolhida, apenas, a classificação da NBR 10004 da ABNT.

Classificação dos resíduos quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente:

- **CLASSE I – PERIGOSOS:** são aqueles que, em função de suas características intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública através do aumento da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.

- **CLASSE II – NÃO-INERTES:** são aqueles que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando como os de Classe I ou Classe III.

- **CLASSE III – INERTES:** são aqueles que não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, e que, quando amostrados de forma representativa, segundo a NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

Classificação dos resíduos quanto a Natureza ou Origem:

- **LIXO DOMÉSTICO OU RESIDÊNCIAL:** são resíduos gerados nas atividades diárias em casas, apartamentos, condomínios e demais edificações residenciais.

- **LIXO COMERCIAL:** são os resíduos gerados em estabelecimentos comerciais, cujas características dependem da atividade ali desenvolvida. Nas atividades de limpeza urbana, os tipos "doméstico" e "comercial" constituem o chamado "lixo domiciliar", que, junto com o lixo público, representam a maior parcela dos resíduos sólidos produzidos nas cidades.

- **LIXO PÚBLICO:** são os resíduos presentes nos logradouros públicos, em geral resultantes da natureza, tais como folhas, galhadas, poeira, terra e areia, e também aqueles descartados irregular e indevidamente pela população, como entulho, bens considerados inservíveis, papéis, restos de embalagens e alimentos. O lixo público está diretamente associado ao aspecto estético da cidade. Portanto, merecerá especial atenção o planejamento das atividades de limpeza de logradouros em cidades turísticas.

- **LIXO INDUSTRIAL:** são os resíduos gerados pelas atividades industriais. São resíduos muito variados que apresentam características diversificadas, pois estas dependem do tipo de produto manufaturado. Devem, portanto, ser estudados caso a caso. Adota-se a NBR 10004 da ABNT para se classificar os resíduos industriais: Classe I (Perigosos), Classe II (Não-Inertes) e Classe III (Inertes).

- **LIXO RADIOATIVO:** considerados os resíduos que emitem radiações acima dos limites permitidos pelas normas ambientais. No Brasil, o manuseio, acondicionamento e disposição final do lixo radioativo estão a cargo da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN.

2.1.2 COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

A composição do RSU pode variar em função de diversos aspectos: sociais, econômicos, culturais, geográficos e climáticos. Os Resíduos Sólidos Urbanos são geralmente compostos por materiais putrescíveis (resíduos alimentares, resíduos de jardinagem e varrição e demais materiais que apodrecem rapidamente), papéis/papelões, plásticos, madeiras, metais, vidros e outros (entulhos, espumas, solos, couro, borrachas, cinzas, tecidos, óleos, graxas, resíduos industriais não perigosos, etc.) (BOSCOV, 2008).

A composição dos RSU apresenta uma grande variação de acordo com o nível de desenvolvimento do país, observando-se conteúdo energético maior e umidade menor nos resíduos de países desenvolvidos. O RSU de bairros com poder aquisitivo menor apresentam teores de material orgânico maiores, constituído principalmente por restos de alimentos, de baixo conteúdo energético. Os bairros com poder aquisitivo mais elevado apresentam porcentagens maiores de papéis e plásticos, de elevado conteúdo energético (IPT/CEMPRE, 2000).

Esta quantidade de RSU não constitui somente um problema de ordem estética, representa uma séria ameaça ao homem. Tão crítico como a ordem estética, está o problema de ordem higiênica que o resíduo traz consigo. Devido à presença de restos de alimentos, o RSU atrai insetos e ratos que, dada a sua elevada taxa de reprodução, propagam rapidamente estas bactérias patogênicas. Particularmente em períodos de chuva, ocorrem nos depósitos de RSU infiltrações de água que penetram até as águas subterrâneas. Se estas águas de infiltração alcançarem águas superficiais ou profundas, elas contribuirão acentuadamente para a eutrofização, por causa de seu elevado teor de substâncias minerais (FELLENBERG, 1980).

No caso do Brasil, uma análise das variações das frações de resíduo sólido existentes no estudo de composição gravimétrica de municípios brasileiros do IPEA (2012) mostrou que a fração orgânica varia entre 20 e 76% (média de 51,4%), a de recicláveis varia entre 14 e 67% (média de 39,5%), e a de outros de 2 a 60% (média 16,7%). Caracterizando o resíduo no Brasil como essencialmente pobre. O alto percentual de matéria orgânica empobrece o resíduo, pois com a quantidade de água contida nessa matéria o potencial calorífero inferior (PCI) é reduzido.

O Poder Calorífico Inferior (PCI) indica a capacidade potencial de um material desprender determinada quantidade de calor, quando submetido à queima, sendo extremamente importante nos processos de tratamento térmico dos resíduos. O método de medição do poder calorífico baseia-se no balanço de energia, na combustão completa da amostra, em geral com oxigênio puro, a volume constante, e na transferência de calor para a água do calorímetro. Normalmente expresso em kcal/kg, pode ser calculado a partir da expressão matemática formulada por THEMELIS (2003) com base em estatísticas levantadas em pesquisas de campo:

$$PCI = [18.500 * Y_{\text{combustível}} - 2.636 * Y_{H_2O} - 628 * Y_{\text{vidros}} - 544 * Y_{\text{metais}}] / 4,185 \quad [1]$$

Tabela 2 - Poder Calorífico de Materiais Encontrados em RSU

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: THEMELIS, Waste in a Land of Plenty – Solid Waste Generation and Management in the US. (2003).

Onde as variáveis $Y_{\text{combustível}}$, Y_{H_2O} , Y_{vidros} e Y_{metais} representam a proporção de cada elemento em 1 kg de RSU. Necessário esclarecer que do peso da fração orgânica combustível (putrescíveis, folhas e madeira) deve ser descontado o peso da água contida nesses orgânicos. Este peso da água corresponde, em percentual, à variável Y_{H_2O} , sendo usual, na ausência de dados específicos, utilizou-se o valor típico de 60% como estimativa do teor de água. A Tabela 2 apresenta o poder calorífico de materiais normalmente encontrados em RSU e permite inferir que resíduos sólidos em que predominam orgânicos tendem a apresentar menor poder calorífico.

Embora a classificação segundo o PCI não deva ser considerada definitiva para estabelecer a destinação do RSU, considera-se que:

- para $PCI < 1.675 \text{ kcal/kg}$, a incineração não é tecnicamente viável (além de dificuldades técnicas, exige ainda a adição de combustível auxiliar);
- para $1.675 \text{ kcal/kg} < PCI < 2.000 \text{ kcal/kg}$, a viabilidade técnica da incineração ainda depende de algum tipo de pré-tratamento que eleve o poder calorífico;
- para $PCI > 2.000 \text{ kcal/kg}$, a queima bruta (“mass burning”) é tecnicamente viável. Usinas a incineração podem gerar entre 450 e 700 kWh por tonelada de RSU.

Outro fator importante a ser avaliado é o teor de umidade do resíduo sólido urbano, que depende necessariamente da composição inicial do material, das condições climáticas locais. Os altos teores de umidade dos resíduos sólidos urbanos são basicamente provenientes dos materiais orgânicos (resíduos alimentares, de jardim e poda). Os componentes inorgânicos, tais como, metais e vidros, geralmente têm um teor de umidade abaixo de 10%.

O teor de umidade tem influência direta sobre a velocidade de decomposição da matéria orgânica no processo de compostagem, na produção de biogás, no poder calorífico, no peso específico aparente do RSU e na produção de lixiviado (líquido derivado da percolação da água da chuva na massa do resíduo, principalmente orgânico), sendo assim, seu conhecimento é de extrema importância para projetos de incineração controlada e outras tecnologias de tratamento térmico.

2.2 DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Com o crescimento das cidades, o desafio da limpeza urbana não consiste apenas em remover o lixo de logradouros de vias e edificações, mas, principalmente, em dar um destino final adequado aos resíduos coletados (LIMA, 2001)

Ao realizar a coleta de lixo de forma ineficiente, a prefeitura é pressionada pela população para melhorar a qualidade do serviço, pois se trata de uma operação totalmente visível aos olhos da população. Contudo, ao se dar uma destinação final inadequada aos resíduos, poucas pessoas serão diretamente incomodadas, fato este que não gerará pressão por parte da população. Assim, diante de um orçamento restrito, como ocorre principalmente nos pequenos municípios, o sistema de limpeza urbana não hesitará em relegar a disposição final para o segundo plano, dando prioridade à coleta e à limpeza pública. Por essa razão, é comum observar nos municípios de menor porte a presença de "lixões", ou seja, locais onde o lixo coletado é lançado diretamente sobre o solo sem qualquer controle e sem quaisquer cuidados ambientais, poluindo tanto o solo, quanto o ar e as águas subterrâneas e superficiais das vizinhanças (DYMINSKI, 2010).

Os lixões, além dos problemas sanitários com a proliferação de vetores de doenças, também se constituem em sério problema social, porque atraem os "catadores", indivíduos que fazem da catação do lixo um meio de sobrevivência, muitas vezes permanecendo na área do aterro, em abrigos e casebres, criando famílias e até mesmo formando comunidades (DELGADO, 2009).

O aterro sanitário é um método para disposição final dos resíduos sólidos urbanos, sobre terreno natural, através do seu confinamento em camadas cobertas com material inerte, geralmente solo, segundo normas operacionais específicas, de modo a evitar danos ao meio ambiente, em particular à saúde e à segurança pública (DYMINSKI, 2010). Na Figura 1 segue um desenho esquemático do aterro sanitário.

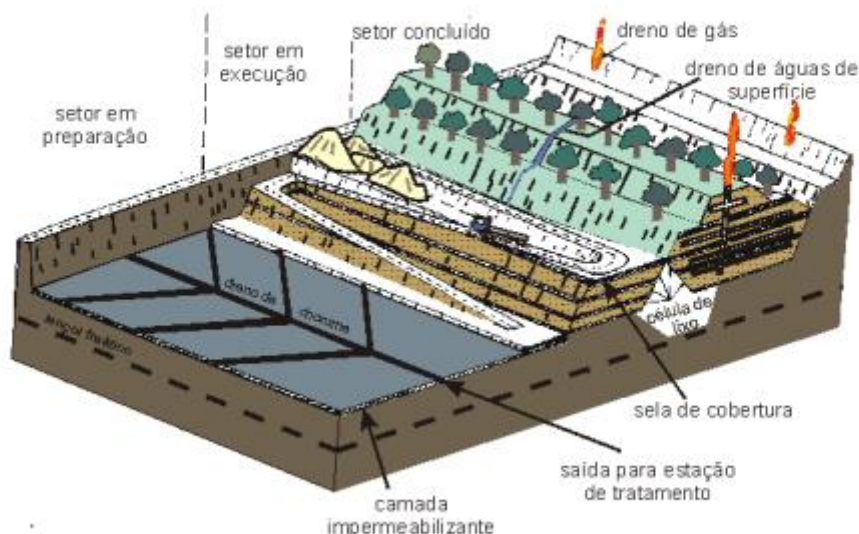


Figura 1 - Aterro Sanitário

Fonte: ECO DEBATE - Destinação final em Aterro Sanitário

Essa técnica consiste basicamente na compactação dos resíduos no solo, na forma de camadas que são periodicamente cobertas com terra ou outro material inerte.

Atualmente, os aterros sanitários vêm sendo severamente criticados porque não têm como objetivo o tratamento ou a reciclagem dos materiais presentes no RSU. De fato, os aterros sanitários constituem-se numa forma de armazenamento de RSU no solo, fato que não pode ser considerado como positivo, uma vez que os espaços úteis a essa técnica tornam-se cada vez mais escassos. Teoricamente, a maioria desses rejeitos pode ser reciclada. Na prática não é o que ocorre. Os fatores de ordem técnica e econômica inviabilizam grande parte dos processos deixando como alternativa o descarte. Não se pode desprezar a realidade econômica, na qual nem sempre a comunidade dispõe de recursos suficientes para a implantação e operação de técnicas onerosas para o tratamento de seus resíduos. O aterro sanitário apresenta algumas vantagens sobre outros processos, dentre as quais podemos destacar:

- Custo de investimento menor que o requerido por outras formas de tratamento de resíduos;
- Operação de menor custo do que o requerido por outras formas de tratamento de resíduos;
- Simplicidade operacional;
- Não requer pessoal altamente especializado;
- Flexibilidade operacional, sendo capaz de operar, mesmo ocorrendo flutuações nas quantidades de resíduos a serem aterradas (CETESB, 1997).

De acordo com documento do Ministério do Meio Ambiente (2011), mais de 90% do resíduo gerado em 2008, em massa, foi destinado para a disposição final em aterro sanitário, aterro controlado e lixão, sendo apenas os 10% restantes distribuídos entre unidades de compostagem, unidades de triagem e reciclagem, unidades de incineração, vazadouros em áreas alagadas e outros destinos, indicando a baixa valorização do resíduo produzido.

2.3 COMBUSTIVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR)

O resíduo urbano depois de passar por processos mecânicos de, basicamente, triagem, separação e trituração, restando, por fim a fração seca do resíduo, deixa de ser chamado de resíduo e passa a ser definido como Combustível Derivado de Resíduos. A produção do CDR é parte do sistema de tratamento térmico, o qual visa a valorizar parte dos fluxos de resíduo pela recuperação do teor energético (MCDUGALL et al., 2001).

Entretanto, não existe uma definição precisa para o termo "Combustível Derivado de Resíduos (CDR)". Ele é interpretado de forma diferente entre os países. O RSU é o termo geral para resíduos sólidos municipais e comerciais e CDR geralmente refere-se à fração de alto poder calorífico e umidade inferior dos resíduos sólidos urbanos (RSU).

Um dos grandes problemas no Brasil advém do fato de não haver coleta seletiva, fazendo com que o custo de processamento desse lixo aumente. O lixo deve, então, passar por mais processos de separação e a parte efetivamente orgânica acaba por contaminar outros materiais que poderiam ter aproveitamento maior (DELGADO, 2009).

Sua utilização acarreta inúmeros benefícios, dentre os quais se destaca o elevado poder calorífico, a homogeneidade da composição físico-química, o fácil armazenamento, manipulação e transporte, a baixa emissão de poluentes e a reduzida necessidade de excesso de ar durante a combustão. Na Figura 2 observa-se um estoque de CDR a céu aberto na Alemanha.



Figura 2 - Estocagem de CDR a céu aberto

Na Itália, o RDF (Refuse Derived Fuel) termo inglês foi usado até 1998, quando a tradução italiana 'Combustibili derivato di rifiuti – CDR' substituiu o termo "RDF". Nos Países Baixos, RDF é utilizado para diferenciar entre biomassa e outros fluxos de resíduos alto poder calorífico. No Reino Unido, o termo RDF ou o combustível de fibra é geralmente utilizada para referir papel /cartão/frações de plástico transformados de resíduos sólidos urbanos (RSU) ou resíduos industriais e pode ser queimado e é dedicado como energia em plantas. Na Áustria e na Alemanha o termo 'Brennstoff aus Müll - BRAM' pode ser equiparado ao termo Inglês "RDF". O termo 'Ersatzbrennstoff' - Substituto combustível é usado em um sentido mais amplo. Outros termos como ' Substitutbrennstoff ', ' Sekundärbrennstoff '- combustível secundário também podem ser encontradas. Na Finlândia, a termo "REF" é mais comumente usado para os resíduos processados de família separada da coleção de qualidade específica. Na Suécia, 'Specialbränsle A' e 'Lattbränsle' são termos usados para 'resíduos' e 'rótulo' combustíveis produzidos em especificações para a indústria de cimento derivados (A. GENDEBIEN, 2003).

Na Europa, durante a crise do petróleo de 1973 os Combustíveis Derivados de Resíduos emergiram como potenciais combustíveis de substituição com baixos custos, porém a abundância do carvão impediu a penetração desse combustível no mercado. Entretanto nos últimos 15 anos tem havido um crescimento no interesse na utilização deste (INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, 2006).

O início do desenvolvimento da tecnologia de CDR ocorreu principalmente no Reino Unido e na Itália. Entretanto, muitas destas tecnologias foram fechadas, devido à dificuldade em se encontrar mercado para o combustível CDR na forma de peletes². A falta de mercado levou ao desenvolvimento do CDR grosseiro, o qual é apropriado para uso local (MCDOUGALL et al., 2001).

² Peletes é o formato compactado do CDR após processo de prensagem.

Os regulamentos atuais exigem elevado padrão de qualidade para o CDR, de modo que este pode ter aceitação como combustível substituto ou auxiliar em muitos sistemas de combustão, com o mínimo de modificações no esquema padrão da planta (CAPUTO e PELAGAGGE, 2002).

Para a obtenção de CDR com alto poder calorífico é necessária complexa linha de produção, que resulta em baixos aproveitamentos mássicos, no sentido que se deve usar muito mais materiais e também se rejeitar bem mais, para obtenção do melhor combustível possível. A busca pelo elevado PCI leva à maior quantidade de passos e menor massa final de CDR. Isso conduz a custos mais elevados de produção os quais reduzem o apelo de mercado do produto (CAPUTO e PELAGAGGE, 2002). Tipicamente, cerca de 30% da massa de entrada é convertida em CDR (MCDOUGALL et al., 2001). O RSU apresenta tipicamente teor energético de 9 – 11 MJ/kg, enquanto o CDR pode apresentar 17 MJ/kg (ENVIROS, 2007). Esse aumento representa a retirada de materiais que não apresentam poder calorífero, como por exemplo, a água.

Uma linha para a produção de CDR contem diversas etapas arranjadas, com o objetivo de separar componentes inertes e recicláveis e condicionar a matéria com alto teor energético a fim de obter combustível de características pré-determinadas. Isto é realizado por meio de sucessivos estágios de tratamento como trituração, classificação, separação, secagem e compactação. O arranjo, o número e posição dos equipamentos de processo ao longo da linha de produção afetam largamente o balanço de massa e a qualidade do produto final (CAPUTO e PELAGAGGE, 2002).

Além disso, uma usina de produção de CDR requer um projeto bem dimensionado, por diversos motivos. Primeiro, a composição exata do RSU é difícil de prever e provavelmente mudará ao longo do tempo. Os equipamentos da WTE são frequentemente derivados de outros setores industriais (exemplo, indústria da mineração) e por isso sua otimização é dificultada pela variação constante do RSU. Finalmente, as dimensões dos diferentes tipos de máquinas são padronizadas, de modo que é difícil atingir a combinação ideal entre as diferentes unidades de operação. Isso implica, muitas vezes, no emprego de linhas paralelas de processos, podendo haver gargalos devido às limitações específicas. Outro ponto é que a configuração de plantas de maiores capacidades geralmente implica na colocação de inúmeras linhas em paralelo, fazendo com que os benefícios da economia de escala sejam perdidos. Além disso, erros no estágio de projeto levam a um rendimento reduzido e um produto final de menor qualidade do que se esperava, com pesadas penalidades econômicas (CAPUTO e PELAGAGGE, 2002).

Há dois processos básicos de CDR, cada um produzindo um produto distinto, conhecido como CDR compactado e CDR grosseiro. O CDR compactado é produzido como peletes. Antes de ser peletizado é seco, de modo a ficar relativamente estável e poder ser transportado, manuseado e armazenado como qualquer outro combustível sólido. Ele pode ser queimado em unidades dedicadas, ou utilizado em co-combustão com carvão e outros combustíveis sólidos (MCDOUGALL et al., 2001).

A decisão de embalar ou queimar/craquear é usualmente definida com base na localização da unidade de gaseificação ou incineração. O combustível derivado do resíduo pode ser estocado e transportado, ou ser utilizado diretamente na planta de qualquer segmento para produção de calor e energia (DEFRA, 2013).

3 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O aproveitamento mais eficaz dos resíduos é o prestado pela própria população quando está empenhada em reduzir a quantidade de lixo, evitando o desperdício, reaproveitando os materiais, separando os recicláveis em casa ou na própria fonte e se desfazendo do lixo que produz de maneira correta (DELGADO, 2009).

Além desses procedimentos, existe uma variedade de processos para o aproveitamento dos resíduos sólidos. Segundo Kothari et al. (2011), as tecnologias mais utilizadas classificam-se em: conversão térmica (incineração, pirólise, gaseificação, produção de Combustível Derivado de Resíduo - CDR), conversão bioquímica (compostagem, vermicompostagem, digestão anaeróbia) e conversão química (transesterificação e outros processos que convertem resíduo orgânico em biodiesel). Nesta pesquisa somente serão estudados a Digestão Anaeróbica, Conversão Térmica por Incineração e Gaseificação e tecnologia de produção de CDR. A escolha do processo de conversão depende das características do RSU (composição e fluxo de material), da forma desejada de obtenção de energia, dos requisitos de uso final, das legislações ambientais vigentes, dos aspectos econômicos e fatores específicos de projeto (KOTHARI et al., 2011).

3.1 TRATAMENTOS TÉRMICOS

O Resíduo sólido é utilizado para a produção de calor e energia desde o início do século 19. O valor calorífico de muitos dos resíduos é entre a quarta parte e a metade do valor calorífico do carvão. Uma variedade de materiais que compõe o RSU pode ser queimada sem o uso de combustível auxiliar. Entretanto, uma vez que há presença de umidade e de material orgânico e/ou inerte, que não contribuem na valorização do poder calorífico, o reaproveitamento térmico é menos eficiente e pode precisar de combustíveis auxiliares. Com um alto teor de umidade uma parte muito grande do calor é perdido pelo calor latente da água. Ou seja, grande parte da energia é perdida na transformação da água líquida para vapor. Isso atrapalha a geração da energia ou de combustível energético.

Por isso, a minimização do teor de umidade é indispensável para a redução do teor de cinzas, para melhorar significativamente a qualidade do combustível e a eficiência de combustão (MCDOUGALL et al., 2001).

3.1.1 INCINERAÇÃO

Tipicamente, um incinerador com recuperação energética é constituído dos seguintes elementos (ENVIROS, 2007):

- Recepção de resíduos e transferência;

- Câmara de combustão;
- Planta de recuperação energética;
- Limpeza dos gases de combustão;
- Manipulação das cinzas de fundo e controle de poluição dos resíduos; e,
- Tratamento de água residual;

As configurações de planta vão variar de acordo com a matéria prima. O RSU é normalmente entregue via veículos de coleta e entornados em um armazém onde é misturado. A mistura é requerida para assegurar, na medida do possível, a equidade do poder calorífico do resíduo de entrada (ENVIROS, 2007).

Na Figura 3 é mostrado o princípio de operação de um incinerador de Resíduos Sólidos. Cada linha de incineração é equipada com um forno com grelha de fundo (8). Ao final da grelha o material remanescente da combustão é coletado como cinzas (cinzas de fundo) e resfriado em água (9). O gás é direcionado para um trocador de calor (10). O calor recuperado na forma de vapor é passado por uma turbina (24) para a geração de eletricidade. Após o resfriamento no trocador, o gás resultante da combustão é então direcionado a um precipitador eletrostático para a separação das cinzas de combustão (12). O precipitador eletrostático utiliza o princípio da atração eletrostática para remover partículas do gás. Ele consiste em uma série de eletrodos de descarga, nos quais são aplicados elevada voltagem. Após esta etapa, um lavador multi-estágios (14) é utilizado para eliminar componentes perigosos do gás como SO_x, HCl pela lavagem do gás em uma torre de reação projetada para promover o máximo de contato entre o gás e o líquido. Em um primeiro estágio, o gás é resfriado pela pulverização de “spray” de água, removendo HCl, HF, particulados e metais pesados. No segundo estágio hidróxido de cálcio ou outra substância alcalina é utilizada para a remoção de SO_x e o HCl remanescente. O líquido do lavador é neutralizado (18), os metais pesados são precipitados (19) e o lodo é separado (20) para na estação de tratamento de água. A água tratada é usualmente despejada em um rio. Após a lavagem, o gás de combustão passa por uma instalação de redução catalítica de NO_x (15). Posteriormente, o gás de combustão purificado é encaminhado para a chaminé. Aproximadamente 75% da massa de resíduo original é transferida para os componentes gasosos como dióxido de carbono, nitrogênio, água e traços de gases (DOKA, 2009).

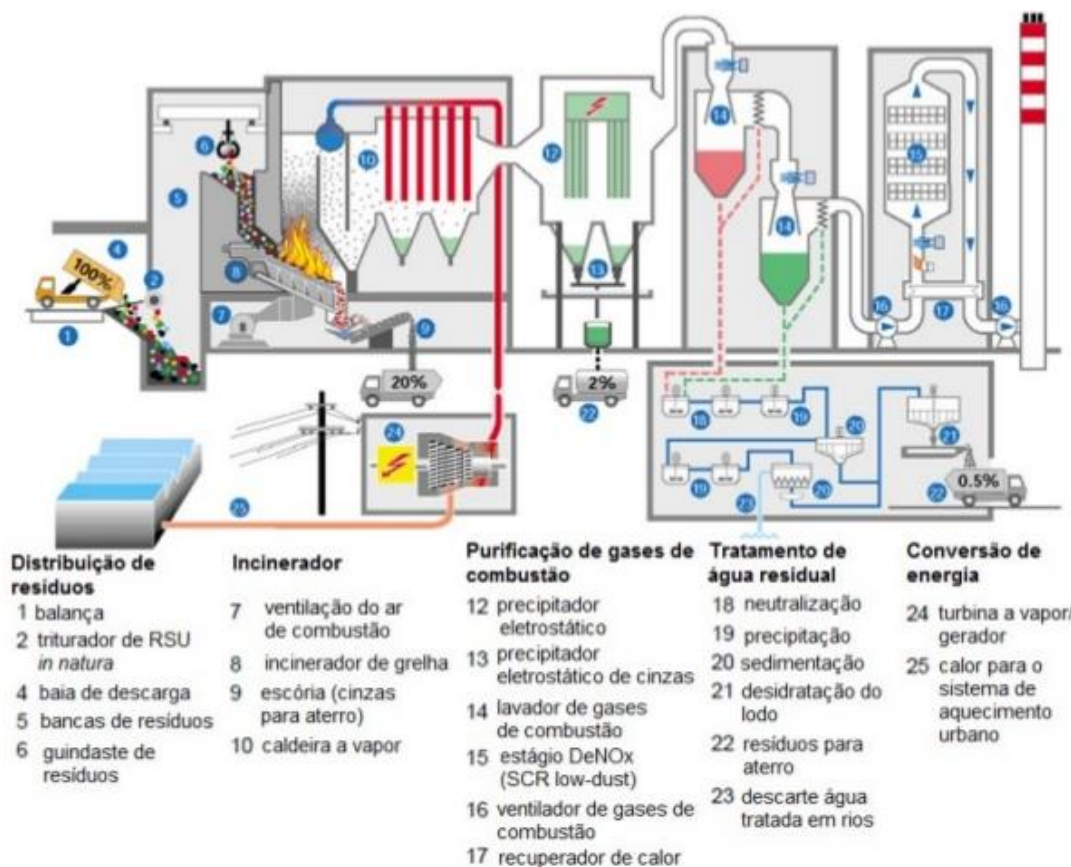


Figura 3 - Planta típica de incinerador com grades móveis

A incineração do RSU é um tratamento eficaz para a redução de seu volume, tornando o resíduo absolutamente inerte em pouco tempo, se realizada de forma adequada. Mas sua instalação e funcionamento são geralmente dispendiosos, principalmente em razão da necessidade de filtros e implementos tecnológicos sofisticados para diminuir ou eliminar a poluição do ar provocada por gases produzidos durante a queima do lixo. Além dos preços elevados de manutenção e operação a incineração não visa o reaproveitamento energético dos resíduos, pode ser considerado um desperdício.

Há três principais tecnologias de combustão que podem ser empregadas no processo de incineração. Ambas as tecnologias presentes são capazes de suprir requisitos técnicos que atendam a legislação europeia, a exemplo, temperatura de combustão mínima de 850°C e tempo de residência do sólido de dois segundos (ENVIROS, 2007). São elas:

- Grelhas fixas e móveis;
- Leito fluidizado;
- Tambores rotativos.

O sistema de grelhas móveis é o mais conhecido. O resíduo é vagarosamente propelido até a câmara de combustão (fornalha) por grelhas mecanizadas. O fluxo de entrada é contínuo, ao passo que também é contínua a saída de cinzas no final da grelha. A planta é configurada para a completa combustão enquanto o resíduo se movimenta pela grelha. As condições do processo são controladas para otimizar a combustão, e assegurar a combustão completa. Ao final da grelha, geralmente há um resfriador para as cinzas quentes remanescentes (Figura 3).

A técnica de combustão em leitos fluidizados envolve uma pré-segregação do RSU para remover metais inertes e pesados (poderia ser também uma linha de processamento de CDR), antes do processamento no forno. O resíduo é então processado mecanicamente com o intuito de reduzir o tamanho das partículas. De modo geral, o resíduo requer mais preparação em comparação com o sistema de forno com grades móveis. A combustão é normalmente um processo de único estágio e consiste em uma câmara forrada com um leito de material inerte granular como areia grossa ou mídia similar (ENVIROS, 2007).

O leito é fluidizado com ar (o qual pode ser diluído com gás de escape reciclado), sendo soprado verticalmente pelo material a uma alta vazão. O resíduo é movimentado pela ação das partículas do leito fluidizado.

Os fornos rotativos possuem vasta aplicação, e podem ser constituídos de vaso de rotação completa ou parcial. Consiste normalmente em um processo de dois estágios: o forno; e uma câmara de combustão separada. O forno consiste na primeira câmara de combustão e é inclinada para permitir o movimento do resíduo de entrada. A rotação move o resíduo pelo forno com a ação de tombamento a qual expõe o resíduo ao calor e oxigênio (ENVIROS, 2007).

3.1.2 GASEIFICAÇÃO

O termo gaseificação é usado para descrever as reações termoquímicas de um combustível sólido (carvão, biomassa, CDR) na presença ar ou oxigênio (O_2), em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para a combustão) e vapor d'água (H_2O), com a finalidade de formar gases que podem ser usados como fonte de energia térmica e elétrica, para síntese de produtos químicos e para a produção de combustíveis líquidos.

O principal produto da gaseificação apresenta-se como uma mistura de gases: monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H_2), dióxido de carbono (CO_2), traços de enxofre (S), outros hidrocarbonetos e leves impurezas. A composição final do gás proveniente da gaseificação dependerá, basicamente, das condições de operação como temperatura, pressão, tempo de residência, das características da matéria prima (matérias voláteis, carbono fixo, cinzas, enxofre, reatividade, etc.), do tipo de reator e das características dos agentes gaseificantes: ar ou oxigênio (ABCM). O principal subproduto sólido do processo é a escória vítrea, um produto quimicamente inerte que pode ser reutilizado como material agregado, comumente conhecido como cinza.

A Figura 4 representa, de forma ilustrativa, um gaseificador, indicando a entrada dos reagentes e saída dos produtos/rejeitos.

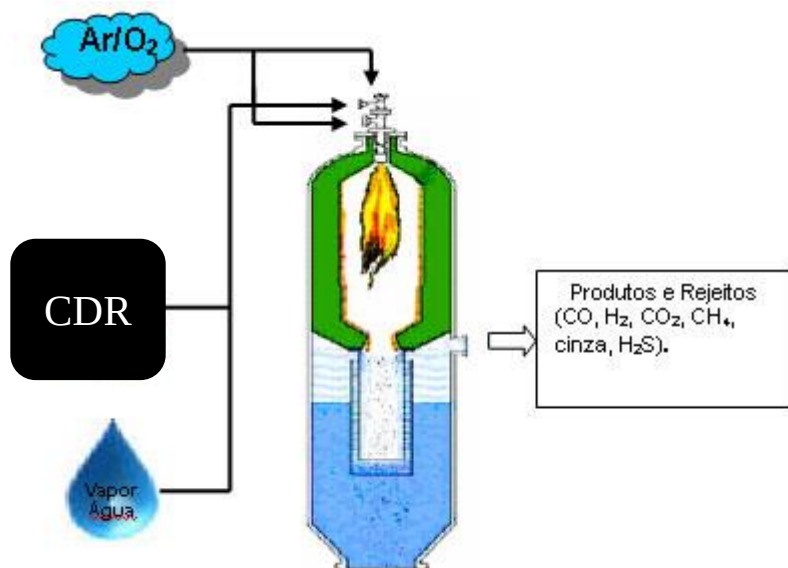


Figura 4 - Representação de um Gaseificador

Fonte: National Energy Technology Laboratory (NETL). (Modificado).

Os principais componentes da mistura gasosa produzida pela gaseificação são o hidrogênio (H_2) e monóxido de carbono (CO). Com o uso de oxigênio e vapor d'água, o gás produto, com a ausência de NO_x , é chamado de gás de síntese (SYNGAS).

A composição do insumo é crucial para o desempenho da tecnologia – os insumos aceitos pelo processo da gaseificação devem ser, na maior parte das vezes, significativamente homogêneos. Para isso, pré-processamento será necessário: é desejada a redução da heterogeneidade de seu conteúdo úmido e das cinzas, visando à adequação dos inputs.

Segundo a Associação Brasileira do Carvão Mineral, dentre os diversos tipos de gaseificadores destacam-se os de leito fixo (Fixed Bed Gasifier), leito fluidizado (Fluidized Bed Gasifier), leito arrastado (Entrained Flow Gasifier).

1. Leito Fixo – A denominação de “leito fixo” é devido à camada de CDR (ou outro combustível) estar suportada dentro do gaseificador por grelhas fixas e apresentando sua espessura mais ou menos constante. Dentro deste leito, o CDR move-se vagarosamente, de cima para baixo, passando por várias zonas distintas, restando finalmente um rejeito, as cinzas, pelo fundo. Os agentes de gaseificação (vapor e ar, O_2 e outros), circulam, geralmente, em contra corrente, de baixo para cima, neste caso, temos o chamado fluxo em contracorrente.

2. Leito Fluidizado – A gaseificação em “leito fluidizado” requer uma alimentação de oxigênio (ou ar) e vapor pressurizado por baixo da tela da câmara de combustão vertical, sendo que o carvão é alimentado por cima, assim o oxigênio e o vapor mantém o CDR moído em suspensão (fluidizado) em constante ebulição para controle da combustão. No processo em leito fluidizado a velocidade dos gases é aquela apenas necessária ao processamento das reações, ainda que não seja suficiente ao arraste das partículas, o qual ocorre no leito fixo. Isto significa que as interações entre fluidos e partículas dão-se com maior intensidade e o processo de gaseificação é mais completo. Esta tecnologia possui dois passos principais. A primeira etapa é a gaseificação do combustível que ocorre no reator de leito fluidizado, e a segunda etapa é a limpeza do gás, que acontece em dois estágios. O primeiro é limpeza do gás quente no reator, seguido da limpeza do gás, ainda quente, no filtro.
3. Leito Arrastado – Para este tipo de gaseificador as partículas de CDR precisam ser muito finas (CDR pulverizado) e são gaseificadas na presença de oxigênio (com muito menos frequência usa-se ar) em fluxo co-corrente. A maioria dos carvões pode ser gaseificada neste tipo de equipamento devido a sua elevada temperatura de operação que funde o CDR e as cinzas, além de proporcionar excelente separação das partículas de CDR dentro do leito evitando aglomeração. Em contrapartida esta elevada temperatura impõe um resfriamento dos gases de saída antes de sua limpeza devido a limitações técnicas destes equipamentos atualmente.

A melhor técnica que pode ser observada com os melhores resultados é a de Leito Fluidizado, por não se conseguir pulverizar de forma barata o CDR e também não é desejável alto teor de cinzas.

O CDR pode ser utilizado como matéria prima a ser queimada, por ser constituído basicamente por carbono, amônia e hidrogênio. O RSU recebido é direcionado para a remoção da fração não combustível. A parte orgânica remanescente é retirada. É necessário que a umidade máxima de 20% seja mantida para viabilizar a recuperação do calor, pois, como já citado, a água contida nos CDR apenas consome energia do gaseificador, ao usar como calor latente para transformar água em vapor.

As cinzas resultantes deste processo são afastadas da base do reator por um sistema fechado. Não há emissão fugitiva de gases do sistema de cinzas. O gás flui do topo do reator por tubos equipados com limpadores mecânicos internos para um recipiente mais limpo. Em seguida ele passa por uma série de limpadores mecânicos para remover particulados ou qualquer partícula sólida que não tenha reagido, mas tenha sido levada pelo fluxo do gás. Este é então resfriado por trocadores de calor para a temperatura requerida pelas máquinas de combustão interna, turbinas ou caldeiras.

Um precipitador eletrostático (de baixa amperagem e alta voltagem) completa a limpeza do gás e o processo de resfriamento. Um sistema de separação autossuficiente de óleo/piche/água recebe o

condensado do precipitador eletrostático. Óleos e piches estão separados e reinjetados no reator. O calor residual recuperado do reator é utilizado para pré-aquecer a carga e reduzir a umidade para o limite aceitável.

A qualidade do gás é monitorada regularmente. O gás alimenta máquinas de combustão interna para geração de energia e as emissões destas máquinas são normalmente bastante baixas. Outra maneira de se obter energia é usar o gás em caldeiras para a geração de vapor e usar o vapor em turbinas a gás (MORRIS, 1999).

A eficiência das plantas de incineração é limitada por restrições técnicas, como a temperatura no super-aquecedor (e também a temperatura do vapor) no sentido de prevenir a corrosão causada pelos traços de HCl em temperaturas muito elevadas. Assim, ocorre uma limitação na temperatura do vapor direcionado para a turbina e em consequência limita também a eficiência geral da planta. Como o gás proveniente da gaseificação é limpo antes de ser queimado, ele pode atingir temperaturas mais elevadas sem comprometer os materiais envolvidos sem que se tenha também o risco de corrosão e sua eficiência pode aumentar em até 30% em relação à incineração.

A gaseificação tem como principal vantagem a redução da quantidade volumétrica de RSU destinadas ao aterro. Redução de peso chega a 75% e redução de volume pode alcançar até 90%. Produz só 8%–12% cinza enquanto durante a incineração se produz entre 15%–20%. O gás advindo do processo de gaseificação possui ainda como vantagem ter 30% a menos de volume do que seria produzido com uma mesma massa RSU incinerado. Desta forma o material necessário para a limpeza dos gases é menor e mais barato.

Outro mérito de gaseificação é que a manipulação dos gases é mais fácil que a de combustível sólido. A eficiência térmica global para a gaseificação é mais alta que a da incineração. No entanto, o mais atraente aspecto é o controle de poluição. Praticamente nenhum gás perigoso (como furanos e dioxinas) é expelido no ambiente. Além disso, área requerida para a planta é limitada quando comparada com outras tecnologias contemporâneas.

Um dos principais deméritos é a manutenção regular requerida para o sistema de limpeza. No caso de ineficácia ou fracasso do sistema de limpeza, o piche e os gases voláteis podem causar danos nas máquinas de combustão interna. Sendo assim, a melhor opção é usar o gás para aplicações térmicas. Este tipo de planta é projetada para tamanhos específicos, e por isso perde versatilidade. O sofisticado sistema de resfriamento, manutenção dos sistemas de limpeza e manutenção e operação regular fazem deste um negócio custoso. Em alguns casos o piche e os gases voláteis não são recirculados para o craqueamento. O vazamento de tais substâncias químicas é venenosa para o vegetação e ambiente de terra (KUMAR, 2000).

Na Tabela 3 é possível verificar um resumo das diferenças entre as tecnologias de gaseificação e incineração.

Tabela 3 - Comparação entre Gaseificação e Incineração

	Incineração	Gaseificação
Vantagens	Tratamento sanitário e a destruição de componentes orgânicos Recuperação Energética diretamente com o RSU	Redução volumétrica de até 90% Alta eficiência térmica global Eficiência é até 30% maior em relação à incineração Baixo Custo de filtros de limpeza Praticamente nenhum gás perigoso é expelido no ambiente Área requerida para a planta é limitada Produção de Syngas
Desvantagens	Limitação da Temperatura do Vapor Limitação da Eficiência Global Baixo controle de poluição Instalações enormes Baixa Eficiência Alta produção de Cinzas Alto custo de filtros para limpeza	Necessidade de Tratamento do RSU Baixa versatilidade Manutenção regular requerido para o sistema de limpeza

3.1.2.1 Transformação de gás em energia elétrica

A produção de Energia Elétrica pode ocorrer de várias formas, nessa pesquisa será considerada a transformação de energia através da queima do gás de síntese (proveniente do craqueamento do CDR no processo de gaseificação) produzindo vapor d'água que irá acionar turbinas acopladas a geradores.

A geração de energia por meio do gás de síntese é mais vantajosa do que a geração por meio de processos de incineração de resíduos. A incineração, como conceito, sofre grande rejeição por parte da sociedade, além de requerer elevados custos de implantação em função da necessidade de equipamentos de controle das emissões gasosas.

A incineração total dos RSU é economicamente inviável, uma vez que a fração orgânica do lixo pode conter cerca de 60% de umidade. Além disso, não está em consonância com um dos preceitos do desenvolvimento sustentável, que é a conservação dos recursos naturais, nem com a política de conservação de energia.

Independentemente do combustível a ser utilizado no processo térmico para geração de energia, ocorrerá a combustão incompleta ou completa dos materiais, como consequência, haverá emissões atmosféricas, o que requer a implantação de equipamentos de controle da poluição.

Segundo Lopes, 2014 “para efeito de utilização do gás gerado na gaseificação para geração elétrica a partir de sistema de turbina a vapor, a caldeira sugerida é a com gerador de vapor superaquecido de alta pressão. Os gases superaquecidos, totalmente oxidados, são aspirados para o gerador de vapor, onde transferem energia, na forma de calor para a água até que, parte desta, passe para a fase gasosa, gere pressão e seja superaquecida para atender uma turbina a vapor. A caldeira a ser utilizada, poderá ser do tipo flama tubular ou então de recuperação, dependendo das dimensões e recursos disponíveis.

Do gerador de vapor os gases seguem para um economizador (trocador de calor gás/água que tem por objetivo recuperar parte da energia dos gases que não foi absorvida pelo gerador de vapor) transferindo-a para a água que irá alimentar o gerador de vapor. Depois os gases seguem para um pré-aquecedor de ar de combustão (trocador de calor gás/gás) que, além de recuperar a última parcela viável de energia contida nos gases também tem a função de aquecer o ar que será utilizado na oxidação do gás de síntese garantindo maiores temperaturas na combustão.

O ciclo da água e do vapor é, teoricamente, fechado. O vapor superaquecido segue para uma turbina à vapor, que absorve uma fração da sua energia através de uma série de rotores, transformando a energia térmica em energia cinética. O vapor, após passar pela turbina, segue para os condensadores.

Novamente na fase líquida, a água retorna a um reservatório, acoplado ao desaerador de água nova, de onde bombas de alta pressão a forçam a passar pelo economizador e a injetam novamente no gerador de vapor. O eixo da turbina está ligado a um gerador que converte a energia cinética em energia elétrica, através da indução eletromagnética. Do gerador, a energia elétrica passa por transformadores para ajuste da tensão à rede de distribuição que a receberá. ”

3.2 TRATAMENTO BIOLÓGICO

Dois processos distintos – processo aeróbio e anaeróbio, os quais utilizam as tecnologias de compostagem, e biodigestão podem dar a destinação adequada a Frações de resíduo orgânico e a parcela não reciclável de papel do RSU. A valorização dos produtos finais (biogás (anaeróbio) e composto (aeróbio e anaeróbio)) é seu principal objetivo (MCDUGALL et al., 2001).

O tratamento biológico envolve a utilização de microrganismos, de ocorrência natural, que decompõem os componentes biodegradáveis do resíduo. Os organismos aeróbios requerem oxigênio molecular como aceptor externo de elétrons no metabolismo respiratório, resultando em rápida taxa de crescimento e elevado rendimento celular. O processo aeróbio tem como produtos principais o dióxido de carbono (CO₂), calor, água e composto orgânico aeróbio. Já metabolismo anaeróbio ocorre na ausência de oxigênio externo, portanto não envolvendo aceptor externo de elétrons. Este metabolismo

fermentativo é menos efetivo na produção de energia que o processo de respiração aeróbia e, portanto resulta em menor crescimento e rendimento celular.

Seus produtos principais são o metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), água e composto orgânico anaeróbio (MCDOUGALL et al., 2001). Os processos biológicos resultam na estabilização do substrato, uma vez que a demanda cumulativa de oxigênio pode ser reduzida cerca de seis vezes em relação à inicial, além da taxa de carbono/nitrogênio (C/N) cair significativamente durante o processo (MCDOUGALL et al., 2001).

Ambos os processos biológicos, compostagem e biodigestão são efetivos na destruição da maioria dos patógenos presentes no substrato. A compostagem é um processo fortemente exotérmico, e pode atingir temperaturas entre 60-65°C, suficiente para destruir a maioria dos patógenos. O processo de biodigestão é somente em parte exotérmico, mas pode operar a temperaturas de 55° (processo termofílico) pelo uso de fonte externa de calor.

Apesar do processo de biodigestão necessitar de um reator fechado, e maior nível de tecnologia que algumas formas de compostagem, esta contenção permite maior controle sobre o processo e sobre a emissão de odores, além de permitir a captura e posterior utilização do gás metano formado. Ainda, o devido à unidade de biogásificação ser usualmente vertical, esta requer menor área (MCDOUGALL et al., 2001).

Quando se observa o tratamento da fração orgânica de RSU sob a perspectiva de economia local e considerações ambientais, o processo anaeróbio leva vantagem em relação à compostagem pela elevada valorização de seus produtos finais (DEFRA, 2011).

Com vistas ao aproveitamento energético, será discutido somente o processo anaeróbio, uma vez que permite a utilização do biogás como fonte de geração de eletricidade ou combustível.

3.2.1 DIGESTÃO ANAERÓBIA (DA)

No processo de oxidação da matéria orgânica em ambientes anaeróbios ocorrem os processos metabólicos de fermentação e respiração anaeróbia. A formação do metano ocorre preferencialmente em ambientes onde oxigênio, nitrato e sulfato não estejam prontamente disponíveis como aceptores de elétrons. Isso porque, na presença destes compostos, a matéria orgânica é oxidada por meio de processos aeróbios, redução de nitrato e sulfato, respectivamente. Naturalmente, a produção de metano ocorre em diferentes ambientes, tais como pântanos, solo, sedimentos de rios, lagos e mares, assim como nos órgãos digestivos de animais ruminantes.

Estima-se que a digestão anaeróbia, com formação de metano, seja responsável pela completa mineralização de 5 a 10% de toda a matéria orgânica disponível na Terra (CHERNICHARO, 2007).

Em princípio, todos os compostos orgânicos podem ser degradados pela via anaeróbia, sendo que o processo se mostra mais eficiente e mais econômico quando os dejetos são facilmente biodegradáveis (CHERNICHARO, 2007).

A digestão anaeróbia representa um sistema ecológico delicadamente balanceado, envolvendo processos metabólicos complexos, que ocorrem em duas etapas sequenciais e que dependem da atividade de, no mínimo, três grupos fisiológicos de microrganismos: i) bactérias fermentativas (ou acidogênicas); ii) bactérias sintróficas (ou acetogênicas); e iii) microrganismos metanogênicos. Cada grupo microbiano tem funções específicas. As bactérias fermentativas acidogênicas convertem, por hidrólise e fermentação, os compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídios) em outros compostos mais simples, principalmente ácidos orgânicos, além de hidrogênio e dióxido de carbono. Os microrganismos sintróficos acetogênicos convertem compostos intermediários, como propionato e butirato, em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Por fim, o acetato e o hidrogênio produzidos nas etapas anteriores são convertidos em metano e dióxido de carbono. Esta conversão é efetuada por um grupo especial de microrganismos, denominados arqueas metanogênicas, os quais são procariotas estritamente anaeróbios (CHERNICHARO, 2007).

Os microrganismos metanogênicos desenvolvem duas funções primordiais nos ecossistemas anaeróbios: i) produzem um gás insolúvel (metano), possibilitando a remoção de carbono orgânico contido na fase líquida; e ii) são responsáveis pela manutenção da pressão parcial de hidrogênio do meio em níveis suficientemente baixos, permitindo que as bactérias fermentativas e formadoras de ácidos produzam produtos mais oxidados, a exemplo o ácido acético, que é substrato direto da metanogênese (CHERNICHARO, 2007).

Além das rotas metabólicas e dos grupos microbianos descritos anteriormente, o processo de digestão anaeróbia pode incluir, ainda, a fase de redução de sulfatos e formação de sulfetos ou, simplesmente, sulfetogênese. Entretanto, as bactérias redutoras de sulfato utilizam hidrogênio e acetato, o que as torna agentes competidoras por substratos comuns aos das metanogênicas. A predominância desta fase depende essencialmente da composição química do substrato (presença significativa de sulfato) e das condições operacionais do reator. A demanda química de oxigênio (DQO) removida pela sulfetogênese leva à produção do gás sulfídrico e pode resultar em problemas de corrosão, emissão de maus odores e toxicidade do meio. Ademais, prejudica a produção de metano, que pode ter seu conteúdo energético aproveitado (CHERNICHARO, 2007).

4 PLANTA DE GERAÇÃO DE ENERGIA

4.1 GERAÇÃO DE ENERGIA COM O RSU

Diferente de outros países, a energia proveniente dos RSU é raramente explorada no Brasil. A União Européia gerou 27.356 GWh elétricos e 35.590 GWh térmicos em 2007 através dos RSU, segundo dados da IEA – Internacional Energy Agency (IEA, 2010). No Japão, a geração a partir do lixo está contemplada na lei nacional de reciclagem e recuperação de energia, lá são produzidas anualmente 50 milhões de toneladas de lixo, deste total 80% são incinerados e o restante é reciclado, a energia é gerada em 190 instalações, de grande escala, que produzem cerca de 1000 MW.

O aproveitamento energético dos RSU contribui para a ampliação da segurança do sistema elétrico nacional, pois a produção de eletricidade se dá de maneira descentralizada, em virtude do RSU estar disponível próximo aos centros consumidores. A redução da quantidade de RSU a ser depositada em aterros sanitários amplia sua vida útil e soluciona um dos grandes problemas da atualidade, a escassez de áreas para novos depósitos de RSU.

Plantas de geração de energia com o RSU são tecnologias novas no Brasil, e apresentam-se como a solução mais pertinente, visto que reaproveita a energia contida no lixo, diminui o volume em até 1% da fração seca. Além de ser possível o reaproveitamento de matérias primas como o vidro e metais, dado que existe a separação destes durante o processo.

Existem hoje no mercado diversas possibilidades de arranjos de equipamentos com as diversas tecnologias encontradas para gerar energia com o lixo, umas mais eficientes outras menos, umas mais caras e outras economicamente mais viáveis.

Como descrito na seção de introdução, considerou-se apenas um arranjo de planta. A planta, então, deverá conter três subplantas principais, a planta de processamento de RSU com produção de CDR, a planta térmica de geração de combustível gasoso e a planta de geração de energia com o combustível gasoso. Ou seja, as tecnologias escolhidas para elaboração do estudo de viabilidade técnica econômica são: tecnologia de produção de CDR a partir do RSU, tecnologia de gaseificação a partir de CDR e por fim tecnologia de geração de energia por caldeiras e turbinas através do gás de síntese.

4.2 ETAPAS PARA A ESCOLHA DAS TECNOLOGIAS PARA A PLANTA DE PROCESSAMENTO DE CDR

A escolha da melhor tecnologia depende diretamente da qualidade do Resíduo Sólido Urbano recolhido nas residências e comércio da cidade. Para que haja melhor gestão desses resíduos é preciso conhecer qual a quantidade e quais os tipos de materiais descartados. A qualidade do CDR obtido é altamente influenciada pela caracterização do RSU recebido nas estações de tratamento, bem como pela

quantidade de processos utilizada para o seu processamento e, ainda, pelo modo como estas estão ordenadas.

O projeto correto de uma unidade de produção de energia com o RSU é uma tarefa delicada, como já supracitado anteriormente nesse texto, devido a vários fatores. O principal é que a composição dos resíduos sólidos urbanos jamais será exata e precisa, por isso é difícil de prever quantidades de energia retirada deles, além de altera-se com o tempo. Os fatores que influenciam estas flutuações devem-se ao fato de o RSU apresentar variações sazonais em termos de quantidade e qualidade (por exemplo: carnaval e feriados implica aumento de resíduos e alteração da composição, assim, também em destinos turísticos em certos períodos do ano em que a produção de RSU aumenta exponencialmente).

Por isso, antes de iniciar a tomada de decisão a respeito de qual tecnologia utilizar deve-se primeiramente elaborar estudos da qualidade do RSU. Com os dados da composição gravimétrica, composição química, pH e poder calorífero inferior (PCI). Será possível, então, passar para as próximas etapas. A composição gravimétrica constitui uma informação importante na compreensão do comportamento dos resíduos, e expressa, em percentual, a presença de cada componente, em relação ao peso total da amostra dos resíduos.

A próxima etapa será a escolha da tecnologia para o processamento. A escolha deve levar em consideração a qualidade energética do RSU que chegará à planta e a quantidade de lixo que será depositada diariamente na planta. A viabilidade econômica aparece como ponto chave nesse contexto. Não seria possível uma planta que elabore o melhor CDR se ela não for economicamente viável, além de eficiente do ponto de vista de reduzir e até mitigar o desperdício de matéria prima.

Outro parâmetro decisivo na escolha da tecnologia é se ao passar pelo processamento o CDR será um combustível ambientalmente correto. Ou seja, elementos que provocam poluição devem ser filtrados antes de serem liberados na atmosfera. Ainda na escolha da tecnologia, deve-se optar por tecnologias nacionais, pois dessa forma se desenvolve o País e as oportunidades de investimentos do BNDES. Se não for possível deve-se encorajar o desenvolvimento de mão de obra para tal e propor transferência de tecnologia entre os países fornecedores. A escolha da tecnologia também deve considerar a ordem descrita no Plano Nacional de Resíduos Sólidos de não utilização, redução, reutilização, reciclagem, reaproveitamento e disposição final, e, portanto, deve prever estações de reciclagem e etc.

Definida a tecnologia e a provável qualidade e quantidade do CDR inicia-se o processo de escolha do local a ser construída a planta. A localização deve seguir alguns pré-requisitos, deve estar nas vizinhanças da cidade, pois o custo de deslocar caminhões é alto, deve estar nas proximidades de uma linha de transmissão de energia, nesse estudo não será abordado o tema sobre as decisões de projeto, mas a planta deve estar necessariamente acoplada a uma planta que utilize o CDR como combustível para geração de energia em uma térmica, também deve estar próxima de um aterro sanitário, para

reduzir custos com logística no caso de problemas como, por exemplo, interrupção de funcionamento devido a problemas não planejados.

Escolhido o local é preciso iniciar a cumprir os requerimentos burocráticos da comercialização do lixo em si e da produção de CDR. Algumas licenças devem ser obtidas para a instalação da planta, tais qual a licença de instalação e operação. A Figura 5 a seguir demonstra as várias etapas de forma esquemática.

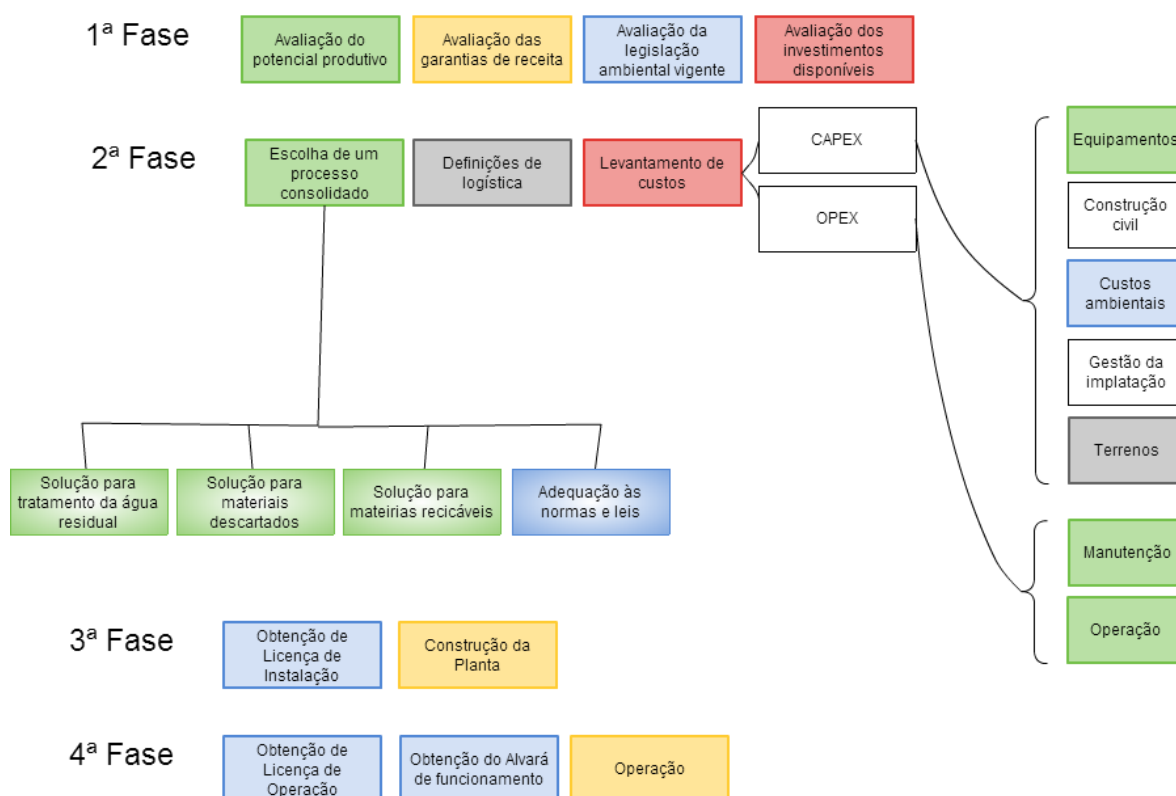


Figura 5 - Etapas para Instalação de Linha de CDR

Para implantação da usina WTE prevê-se quatro fases principais até a operação da planta. Na primeira fase, considerada apenas de prospecção de projeto. Nessa fase apenas são estudadas as formas de se gerar energia ou gerar produtos rentáveis. Atentando-se as questões legais da legislação ambiental e das oportunidades de investimento na área.

Na segunda fase, o processo tecnológico consolidado deverá ser escolhido atentando-se a definições logísticas e aos levantamentos de custos. Os custos são formados pelo valor dos equipamentos e de projetos, custos de construção e instalação da usina, custos ambientais e sociais, custos relacionados à gestão do empreendimento, terrenos e os custos de operação e manutenção do maquinário.

Na terceira fase, com o projeto definido e consolidado, a emissão das licenças de instalação é esperada para essa fase, porém ela foi requerida na segunda fase. Com a licença emitida inicia-se a construção do empreendimento.

Concluída a construção da planta, inicia-se a quarta fase com o pedido de licença de operação e do alvará de funcionamento. Só então a usina poderá entrar em operação.

Como regra geral, segundo Caputo e Pelagagge (2002), uma linha de tratamento de RSU deve iniciar o processamento com um shredder ou com um triturador, pois, senão todos os equipamentos seguintes serão menos eficientes. Porém, iniciar uma linha com um shredder poderá provocar bloqueios frequentes devido aos componentes difíceis de destroçar e que não tenham sido previamente selecionados por triagem manual, separadores magnéticos ou densimétricos.

Já segundo Chang (1997), o CDR pode ser produzido por meio de um número de diferentes processos que são descritos de forma ilustrativa no esquema da Figura 6.

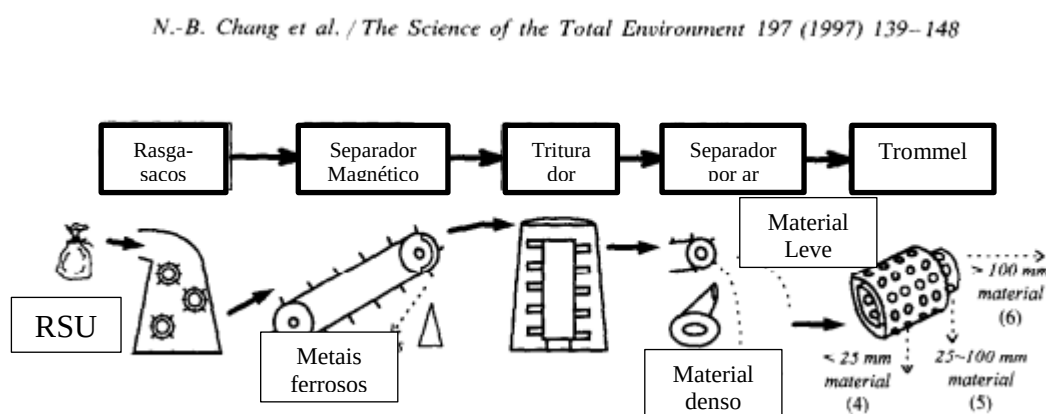


Figura 6 - Fluxograma do Processo de Pré-triagem dos Resíduos

Fonte: N.B. Chang et al. /The Science of the Total Environment 197 (1997)

Para Chang (1997), o processo de pré-triagem proposto consiste em três subsistemas principais: trituração, separação por ar e rastreio. Nesse exemplo, a unidade pode processar 30 toneladas por hora (t/h) na capacidade máxima por linha única. O RSU é entregue à instalação por caminhões em sacos de plástico. O rasga-sacos, responsável pela abertura desses sacos plásticos, inicia o processo de triagem. Metais ferrosos são extraídos no separador magnético (eletroímãs), após a unidade do rasga-sacos. O metal ferroso recuperado é transportado para armazenamento e é reciclado. O RSU é então enviado em um triturador e em seguida um separador por ar, utilizando um transportador do tipo de correia. Metais não ferrosos, tais como latas de alumínio e outros, bem como o RSU são triturados pelo triturador. O separador por ar, soprando com uma corrente de ar regular de 200 m³/min, separando então os inertes, tais como o vidro, cerâmica, para reduzir o teor de materiais sem energia associada. Materiais leves, passando pelo separador por ar, são enviados para a tela do trommel para separação. As dimensões das aberturas da superfície da tela de crivo rotativo podem ser variadas para afinar a função de processamento e assegurar a máxima recuperação de combustível.

Outros modelos de processamento propõem:

- Separação na fonte;

- Classificação ou separação mecânica;
- A redução de tamanho (retalhamento, chipping e moagem);
- Separação e triagem;
- Mistura;
- Secagem e peletização (optativo);
- Embalagem;
- Armazenamento.

Tipicamente, o material de resíduos é peneirado para remover a fração reciclável (por exemplo, metais), frações inertes (como vidro e pedra) e separar a fração orgânica (por exemplo, alimentos e resíduos de jardim), contendo alto teor de umidade. Os materiais orgânicos e úmidos podem, em seguida, submeter a novo tratamento como a compostagem ou a digestão anaeróbia ou ainda serem desidratados e reaproveitados no processo de produção de CDR, podem, ainda, serem depositados em aterros.

Nem todo o material que entra no processamento vira combustível, grande parte é basicamente água, outra parte deve ser reciclada, outra parte é inerte. Então, mais uma vez, cada projeto haverá a sua característica. Cada planta deve ser projetada especificamente para um tipo de RSU que vai ser entregue. O principal é entender como funciona essa planta de processamento, nas seções seguintes será explicado, mediamente, as tecnologias dos equipamentos que estão normalmente presentes nas plantas mundialmente instaladas. Novamente, são diversas tecnologias e o estudo aborda aquelas mais conhecidas e vendidas no contexto de gestão de resíduos.

4.2.1 EQUIPAMENTOS DA PLANTA DE CDR

Os equipamentos dentro da linha de produção são definidos para cada projeto, e os principais processos utilizados nas instalações de produção de CDR visam:

- Separação mecânica e seleção de fluxos;
- Redução de tamanho das partículas;
- Embalagem e armazenamento.

Nas próximas seções serão descritos os equipamentos mais tradicionais das plantas de processamento de CDR encontradas mundialmente.

4.2.1.1 *Recebimento e movimentação de cargas*

As toneladas de resíduos chegam à planta por meio de caminhões de coleta. Para grandes quantidades diárias de RSU seria impossível não haver um local de recebimento que controlasse a entrada de resíduos. Assim como internamente as toneladas de lixo circulam de equipamento para

equipamento através de máquinas de transporte, denominadas esteiras. Em alguns casos o recebimento de lixo é feito em uma grande vala com pressão negativa e esse resíduo é recuperado através de garras colocadas ou em gruas ou em pórticos rolantes.

- **BALANÇA**

As balanças são colocadas na portaria de entrada da planta, funcionam como a balança rodoviária, o caminhão para sobre ela e então é obtida a quantidade de resíduo que está entrando na planta. Esses valores são importantes, pois parte da receita desse projeto se dá pelo valor pago pelas prefeituras pela destinação final de resíduos. Além da receita esses valores são importantes para atualização de eficiências da planta.

- **ESTEIRAS**

As esteiras são elementos de transporte que podem ter diversos formatos e tamanhos, mas sua função chave sempre será transportar uma carga de um lugar a outro, no caso do projeto transportar RSU de uma máquina a outra. As esteiras são utilizadas também em processo de separação, como descrito na Figura 7.



Figura 7 - Separador de Não ferrosos

Fonte: Instituto Superior Técnico, CEBQ – Centro de Engenharia Biológica e Química.

4.2.1.2 Redução de tamanho

Nesta fase do processo as operações visam à redução da granulometria do RSU tanto para aumentar o seu grau de homogeneização quanto para facilitar as fases de separação seguintes. A operação principal é a de trituração. A depender do tipo de resíduo um tipo específico de triturador deve ser escolhido. Serão explicitados dois maquinários, o shredder e o triturador. A diferença básica entre eles é a granulometria de entrada e final. Na Figura 8 estão descritas algumas dessas tecnologias.



Figura 8 - Redução de Tamanho - a. Shredder, b. Triturador Simples, c. Triturador Eixo Simples d. Triturador quadruplo.

4.2.1.3 Separação mecânica e seleção de fluxos

As operações dessa fase têm como objetivo separação das várias frações que constituem o RSU, tais como frações recicláveis, frações orgânicas, frações essas que não devem fazer parte do produto final, o CDR. Estas operações têm lugar no início das linhas de produção de CDR e após as operações de redução de volume. A Tabela 4 resume os principais tipos de operações de separação que têm lugar e identifica os fluxos de contaminantes separados.

Tabela 4 - Processo de Separação de Fluxos

Operação	Fluxo de materiais separados	Principais exemplos das técnicas utilizadas
Triagem manual	Vários	
Separação mecânica	Fracção leve/fracção pesada	Grua/garra Balde/alcatruz
Separação magnética de metais	Metais ferrosos	Tambor rotativo <i>Pulley</i> <i>Cross belt</i> <i>In line</i>
Separação não magnética de metais	Alumínio	Corrente de <i>Eddy</i> Cascata
Separação gravimétrica e densimétrica	Fracção leve/fracção pesada	Separação por vento Separação ballística Separação húmida
Crivagem e peneiração	Fracção pequena/Fracção grande	Tambor rotativo (<i>trommel</i>) Crivo oscilante Crivo de discos Crivo de estrelas

4.2.1.4 Embalagem e armazenamento

A embalagem e armazenamento do CDR exigem alguns cuidados de segurança, dado que este pode ser inflamável sob determinadas condições ambientais. A formação de gás explosivo do CDR ocorre devido ao aumento brusco de temperatura causado pela oxidação da matéria orgânica, com o ar que a rodeia, estando este aumento de temperatura relacionado com o raio da pilha cilíndrica onde o CDR é armazenado.

O armazenamento deverá respeitar as distâncias e alturas de segurança entre as diferentes filas de fardos. Um estudo elaborado por Gao e Toshisuke (2006), concluiu que a relação entre o raio da pilha de armazenamento e a temperatura crítica (temperatura máxima para que o aumento brusco de temperatura não ocorra) no seu interior é representada no gráfico da Figura 9 permite obter uma estimativa para o correto dimensionamento da zona de armazenamento do CDR.

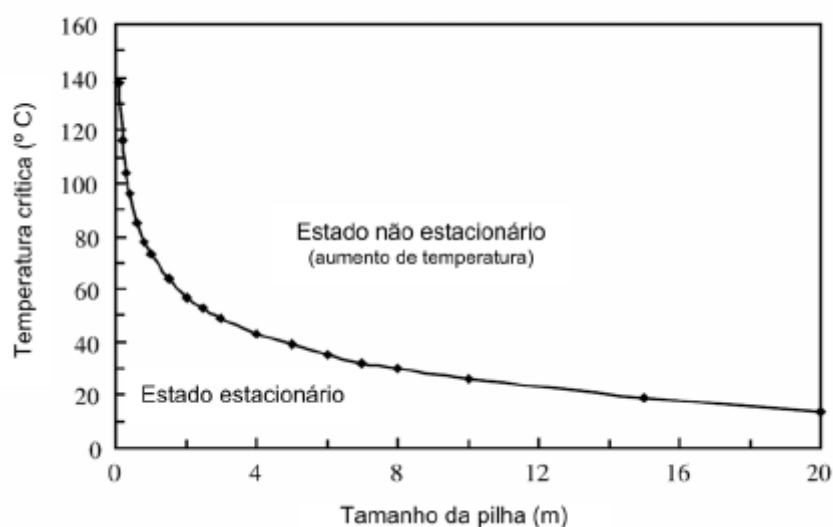


Figura 9 - Relação entre o raio da pilha e a temperatura crítica

4.3 MATERIAIS NÃO TRANSFORMADOS EM COMBUSTÍVEL

Cerca de 70% do RSU em peso não é reaproveitado como combustível para a geração de energia, já que uma parte é composta por materiais recicláveis, uma grande parte é água, proveniente do lixo orgânico, uma parte é cinza, proveniente do processo de gaseificação e uma parte é material inerte, que não reage em nenhuma das partes e não tem energia agregado em sua composição.

4.3.1 MATERIAIS RECICLÁVEIS

A reciclagem surgiu como uma maneira de introduzir novamente no sistema uma parte da matéria e da energia que se tornaria resíduo. O ato de reciclar faz com que um determinado material retorne ao seu ciclo de produção, a partir de vários processos de separação dos materiais existentes nos resíduos, que poderão, após seu beneficiamento, retornar à indústria como matéria prima. Como vantagens deste

processo têm-se a preservação dos recursos naturais, a economia de energia, a redução da quantidade de resíduos a ser disposta em aterros, além da geração de empregos e serviços. A partir destas vantagens há uma redução dos impactos que poderiam ser gerados ao meio ambiente com a produção de energia para o beneficiamento dos recursos naturais, assim como da destinação final dos resíduos.

Os materiais que tem valor expressivo são os metais ferrosos, o vidro e o alumínio. No Brasil, a maior parte do alumínio é reciclada, o que não acontece com o vidro e os metais ferrosos.

4.3.2 CINZAS

A gaseificação de resíduos transforma o RSU basicamente em três produtos: cinzas, gás de síntese e calor. As cinzas são, em sua maioria, formadas por constituintes inorgânicos que estavam presentes nos resíduos (CARVALHAES, 2013) ou ainda que não sofreram gaseificação. As cinzas geradas no processo são classificadas como resíduo classe II B – inerte, segundo as normas da ABNT (2004). Esse material poderá ser incluído na fabricação de agregados de cimento para construção civil, por exemplo. Ou essas cinzas devem ser descartadas em um aterro de rejeitos ou, ainda, devem receber um novo tratamento para diminuir ainda mais seu volume.

4.3.3 DESTINAÇÃO FINAL PARA RESÍDUOS NÃO PROCESSADOS

Nem todo resíduo que passa pelo processo de reaproveitamento energético pode ser consumido no sistema, existem os materiais inertes - resíduos que simplesmente não sofrem a ação dos diversos processos e acabam por se transformarem em escória. Esses produtos devem ter uma destinação final, não podem se acumular na planta de geração de energia, o meio mais apropriado para tal, seria a deposição em aterro sanitário. Se todos os resíduos passassem por processos de reaproveitamento energético a saturação do aterro sanitário seria prolongada por pelo menos 170%, que é redução média de volume do lixo.

5 CENÁRIOS

Para a aplicação da metodologia de verificação de viabilidade técnica e econômica é necessário comparar ou dois ou mais cenários, ou duas ou mais tecnologias, ou dois ou mais arranjos de equipamentos. Para essa pesquisa foi escolhida a opção de dois cenários distintos (diferentes capacidades produtivas), mesmas tecnologias e mesmos arranjos de equipamentos, devido à grande dificuldade de se obter dados relativos a empreendimentos energéticos. Portanto, apenas uma tecnologia será tratada, a de geração de energia com o RSU, utilizando a sequência obrigatória de equipamentos que está descrita na Figura 10.

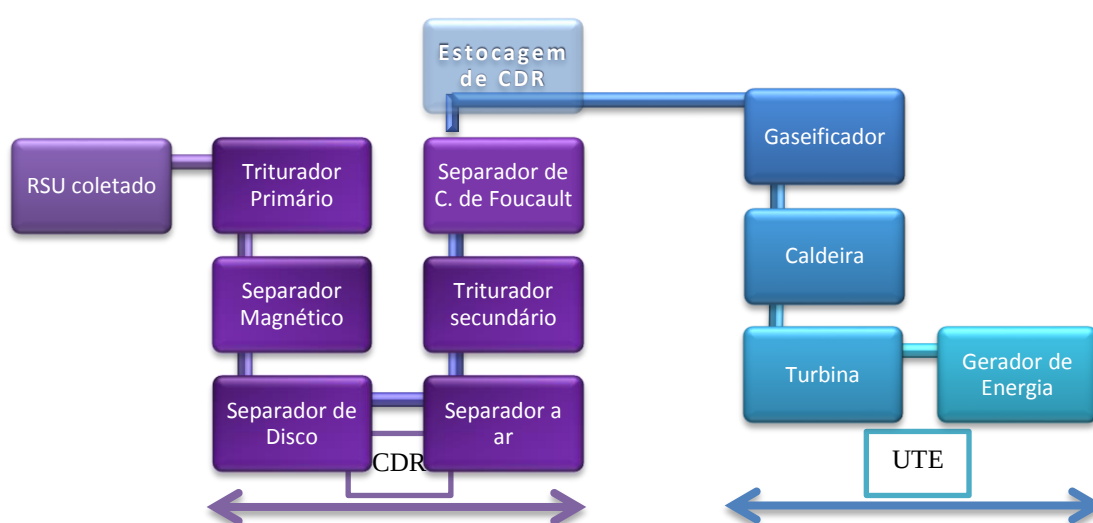


Figura 10 - Descrição do Cenário

O cenário 1 será o cenário de geração de energia por meio da entrega de 400 toneladas por dia de RSU, esse valor está coincidente a produção de lixo de cinco municípios de médio porte. Essa escolha foi feita para garantir o tratamento adequado para cinco municípios e para dividir em cinco os custos de investimento inicial. A escolha está de acordo com a geração média de lixo por habitante no Brasil, no caso 1,065 kg por dia.

O cenário 2 será o cenário de geração de energia por meio da entrega de 1200 toneladas por dia de RSU, esse valor está coincidente a produção de lixo ou de 3 municípios de grande porte ou de uma cidade como Belo Horizonte (1,433 milhões) ou de metade da geração de Brasília (2,481 milhões) ou Salvador (2,675 milhões). Essa escolha foi feita para garantir o tratamento adequado para cidades e grandes municípios. A escolha está de acordo, também, com a geração média de lixo por habitante no Brasil, no caso 1,065 kg por dia. Sintetizando os dados dos cenários, segue a Tabela 5.

Tabela 5 - Cenários

	Cenário 1	Cenário 2
Quantidade de RSU entregues diariamente	400 ton/dia	1200 ton/dia
Nº médio de habitantes geradores de RSU	375 mil	1.100 milhões

Na primeira etapa do processamento, no triturador primário, os sacos de lixo se rompem e o RSU sofre redução de tamanho, as partes passam a medir de 50 mm a 80 mm, dessa forma o material resultante será separado com maior facilidade. Continuando na linha o ‘RSU’ passa pela primeira separação de metais ferrosos, no separador magnético, através de eletroímãs, facilitando e melhorando a separação na próxima etapa que é a separação do orgânico, no separador de disco. A parte de RSU sem metais ferrosos e de granulometria reduzida passa pelo separador de disco, que é responsável pela separação de orgânicos e através de esteiras rolantes esse material é levado para outra etapa, a de secagem (a umidade desse material orgânico passa de 80% a 23% de umidade). E a outra parte não orgânica segue na linha e sofre outra separação, a separação por ar. Essa etapa separa o material por densidade, ou seja, elementos com densidade inferior a 75 kg/m^3 - leves, e superiores a 450 kg/m^3 - pesados, a mistura que chega nesse equipamento tem densidade média de 100 a 150 kg/m^3 e a fração que tem poder calorífero relevante é a fração leve, portanto nessa separação as pedras, vidros e materiais de construção e outros eventuais metais que não tenham sido separados serão definitivamente separados nesta etapa. A parcela que continua na linha, a efetivamente combustível, segue para o ultimo processo de redução de tamanho, a trituração secundária, e por fim o Alumínio, que é danoso ao gaseificador, é retirado na ultima separação, a corrente de Foucault.

Ao fim da linha os seguintes materiais serão obtidos separadamente: CDR, metais ferrosos, alumínio, vidro e pedras e resíduos de construção, água e outros materiais inertes. Após esses processos descritos o RSU é transformado em CDR. Portanto, o material resultante dessa linha é o CDR, um material com alto poder calorífero e pronto para ser craqueado no gaseificador. O principal subproduto do processo é a água residual, que será tratada e reutilizada no processo.

A gaseificação é o conjunto de reações que se processam no interior de um reator com a injeção de ar rarefeito e o CDR é utilizado como combustível, por serem constituídos basicamente de carbono, amônia e hidrogênio. É necessário, apenas, que a umidade máxima de 20% seja mantida para viabilizar a recuperação do calor, pois a água contida no CDR não serve para aproveitamento de energia, apenas para consumir a energia do gaseificador e usar como calor latente para transformar agua em vapor. As

cinzas resultantes deste processo são afastadas da base do reator por um sistema fechado. Não há emissão fugitiva de gases do sistema de cinzas.

A gaseificação em leito fluidizado, caso do projeto em questão, requer uma alimentação de ar e vapor pressurizado por baixo da tela da câmara de combustão vertical e CDR alimentado por cima, assim o oxigênio e o vapor mantêm o CDR moído em suspensão (fluidizado) em constante ebulição para controle da queima. No processo a velocidade dos gases é aquela apenas necessária ao processamento das reações, ainda que não seja suficiente ao arraste das partículas. Isto significa que as interações entre fluidos e partículas dão-se com maior intensidade e o processo de gaseificação é mais completo. Esta tecnologia possui dois passos principais. A primeira etapa é a gaseificação do combustível que ocorre no reator de leito fluidizado, e a segunda etapa é a limpeza do gás, que acontece em dois estágios. O primeiro é limpeza do gás quente no reator, seguido da limpeza do gás, ainda quente, no filtro.

O principal produto da gaseificação apresenta-se como uma mistura de gases: monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), traços de enxofre (S), outros hidrocarbonetos e leves impurezas. A composição final do gás proveniente da gaseificação depende das condições de temperatura, pressão, tempo de residência, das características da matéria prima (matérias voláteis, carbono fixo, cinzas, enxofre, reatividade, etc.), do tipo de reator e das características do ar rarefeito. O principal subproduto sólido do processo é a escória vítrea, um produto quimicamente inerte que pode ser reutilizado como material agregado, a cinza. Ou depositada em aterro sanitário comum.

No processo de limpeza, o gás flui do topo do reator por tubos equipados com limpadores mecânicos internos para um recipiente mais limpo. Em seguida, o gás passa por uma série de limpadores mecânicos para remover particulados ou qualquer partícula sólida que não tenha reagido, mas tenha sido levada pelo fluxo do gás. Este é então resfriado por trocadores de calor para a temperatura requerida pelas máquinas de combustão interna, turbinas ou caldeiras.

A utilização do gás de síntese gerado na gaseificação para geração elétrica a partir de sistema de turbina a vapor e a caldeira escolhida é a com gerador de vapor superaquecido de alta pressão. Os gases superaquecidos, totalmente carburados, são aspirados para o gerador de vapor, onde transferem energia, na forma de calor para a água até que, parte desta, passe para a fase gasosa, gere pressão e seja superaquecida para atender uma turbina a vapor.

Do gerador de vapor os gases seguem para um economizador (trocador de calor gás/água que tem por objetivo recuperar parte da energia dos gases que não foi absorvida pelo gerador de vapor) transferindo-a para a água que irá alimentar o gerador de vapor. Depois os gases seguem para um pré-aquecedor de ar de combustão (trocador de calor gás/gás) que, além de recuperar a última parcela viável de energia contida nos gases também tem a função de aquecer o ar que será utilizado na combustão do gás de síntese garantindo maiores temperaturas na queima.

O ciclo da água e do vapor é fechado. O vapor superaquecido segue para uma turbina a vapor, que absorve uma fração da sua energia através de uma série de rotores, transformando a energia térmica em energia cinética. O vapor, após passar pela turbina, segue para os condensadores.

Novamente na fase líquida, a água retorna a um reservatório, acoplado ao desaerador de água nova, de onde bombas de alta pressão a forçam a passar pelo economizador e a injetam novamente no gerador de vapor. O eixo da turbina está ligado a um gerador que converte a energia cinética em energia elétrica, através da indução eletromagnética. Do gerador, a energia elétrica passa por transformadores para ajuste da tensão à rede de distribuição que a receberá.

6 VIABILIDADE TECNICO ECONOMICA

Neste capítulo será desenvolvida a metodologia para avaliação técnico econômica da planta de geração de energia com Resíduos Sólidos Urbanos, de acordo com os cenários escolhidos. Os fatores que comporão a análise serão: vida útil, custo do combustível, valor residual, impacto ambiental, potência instalada, investimento inicial, taxa de juros, escala e fator de capacidade.

Será elaborada uma análise da viabilidade econômica da planta de geração de energia com o RSU, para verificação e comparação do benefício econômico dessa tecnologia de geração de energia entre os cenários escolhidos. Empregando-se a metodologia desenvolvida por CARVALHO (2006).

Esta ferramenta calcula o custo de um mesmo produto ou serviço em suas duas alternativas de produção ou execução, que neste caso é a energia elétrica gerada. Neste contexto, os dados de entrada do modelo são de fundamental importância à obtenção de resultados aderentes, decisivos para o estudo de viabilidade do empreendimento estudado: o investimento inicial, o fator de capacidade, o rendimento do sistema, o custo de combustível e o custo da eletricidade, obtidos neste estudo conforme se segue.

A análise de viabilidade econômica de empreendimentos de energia é imprescindível para sua implantação. A viabilidade de usinas Waste to Energy depende de diversos fatores, como: características do insumo, custos capitais, custos de Operação e Manutenção, condições de mercado, regulações (EPRI, 2011), entre outros. Além disso, a economia deste tipo de negócio é muito específica para cada localidade, dependendo largamente de incentivos locais, características dos resíduos, etc. (EPRI, 2011).

Para que o empreendimento seja viável economicamente as receitas devem exceder os gastos por ano da usina. E ainda devem pagar os investimentos iniciais num tempo razoável de anos. O Fluxo de Caixa do negócio será a soma do total da receita ao ano e do total de gastos ao ano. Os gastos anuais são relacionados à Operação e Manutenção (O&M) da planta e à taxa que se deverá pagar para a disposição final das cinzas do processo de conversão e dos outros subprodutos inertes. Os custos podem ser, portanto:

- Custos de O&M da planta: gastos relacionados ao pagamento do trabalho empregado na operação e na manutenção da planta, e ao pagamento do uso/aquisição de equipamentos na manutenção da planta;
- Custos de disposição final de subprodutos, como as cinzas: gastos relacionados ao pagamento feito a aterros para que os subprodutos do processo de conversão sejam dispostos.

As receitas estão associadas ao recebimento da TDF pago pelas prefeituras e principalmente a venda de energia. Há também a venda de metais ferrosos e não ferrosos recuperados do fluxo de lixo, que podem ser revendidos para reuso. As receitas serão, portanto:

- Receitas relacionadas à venda da energia elétrica produzida;
- Receitas relacionadas à taxa de destinação final paga pelas prefeituras: a usina receberá do município para receber quantidades de Resíduos Sólidos Urbanos;
- Receitas relacionadas à venda de metais ferrosos e não-ferrosos;

Segundo Mendes (2007), a economia do empreendimento será, portanto, reflexo do fluxo de caixa. A seguir são apresentados os principais fatores que influenciam a viabilidade econômica de um empreendimento Waste to Energy, incluso fatores que afetam a variação de receitas e custos:

- Fator de Capacidade: o tempo parado da usina afetará a quantidade de lixo que será tratada. A planta não tratará lixo enquanto não estiver funcionando, e, portanto, não gerará energia neste meio tempo, a não ser que se tenha estoque; como consequência, cairá a quantidade de energia vendida, e a respectiva receita.
- Eficiência da planta: dependendo da eficiência da planta, maior será a quantidade de energia gerada, fazendo aumentar a receita do empreendimento. De outra maneira, a eficiência poderá afetar o custo com serviços de Operação e Manutenção – supondo a geração de uma quantidade fixa de energia, a eficiência ditaria a quantia de resíduos sólidos a ser enviada à planta, ocasionando em maior ou menor esforço, dependendo do volume de lixo a ser tratado.
- Valor dos serviços de Operação e Manutenção (O&M): o valor a ser pago pelos serviços de Operação e Manutenção afetará os custos do empreendimento. Os custos de O&M são compostos de parcelas fixas e variáveis, e são influenciados principalmente pela composição do lixo e pela eficiência da queima – fatores que afetam a frequência e intensidade do uso de serviços de O&M e, portanto, os gastos relacionados.
- Preço da energia a ser vendida: influenciará a receita do empreendimento. Quanto maior o valor da energia, maior o retorno.
- Valor a ser recebido pelo tratamento dos resíduos sólidos: quanto maior o valor pago por tonelada a ser tratada, maior a receita do empreendimento. Esse valor variará de região para região. Por exemplo, regiões densamente povoadas, com escassez de áreas livres, pagam mais para ter os resíduos sólidos tratados (e.g., no Japão paga-se aproximadamente R\$ 250 por tonelada de resíduos sólidos urbanos), enquanto que regiões com áreas livres em abundância geralmente pagam menos (e.g., tipping fee no Brasil varia de \$15 a \$20 USD por tonelada de resíduos sólidos enviados para tratamento).

A viabilidade dos empreendimentos depende não somente de questões financeiras, mas também de questões operativas – e de questões externas à usina, como competitividade do mercado, incentivos governamentais, entre outros. É essencial que se haja uma análise de viabilidade econômica do

empreendimento, que leve em consideração diferentes cenários macroeconômicos, antes de qualquer tomada decisão relativa à realização do empreendimento.

Será apresentado um critério para a Análise Custo/Benefício da planta de geração de energia com o lixo, conforme descrita em capítulos anteriores, permitindo a comparação desse empreendimento com outras diferentes tecnologias em distintos cenários, nas mais diversas situações de interesse para o Setor Energia. Os resultados que serão gerados são facilmente interpretáveis por técnicos habituados ao tema energia (CARVALHO, 2006).

Com a metodologia a abordagem será conduzida analiticamente até a sua expressão final, permitindo avaliar de maneira fácil e natural a sensibilidade de parâmetros, ou realizar diversos outros diagnósticos de interesse.

6.1 DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

A distribuição típica dos custos de um empreendimento energético no tempo é apresentada no Fluxo de Caixa mostrado na Figura 11. Podemos observar que os custos distribuídos são modelados através de Fluxos de Caixa uniformes (CARVALHO, 2006). A metodologia que será aplicada usa uma simplificação desse Fluxo de Caixa.

A Figura 11 representa com pouca simplificação o Fluxo de Caixa real ao longo da vida de uma instalação para produção ou economia de energia. Onde:

- v – Vida Útil da Instalação [anos]
- CI – Custo de Instalação [US\$/ano]
- CE – Custo do Equipamento [US\$]
- CM – Custo de Manutenção e Operação [US\$/ano]
- CC – Custo do Insumo Energético [US\$/ano]
- VS – Valor do Subproduto [US\$/ano]
- R – Valor Residual do Investimento ao fim da vida útil da instalação [US\$]
- tc – Tempo de Construção [anos]

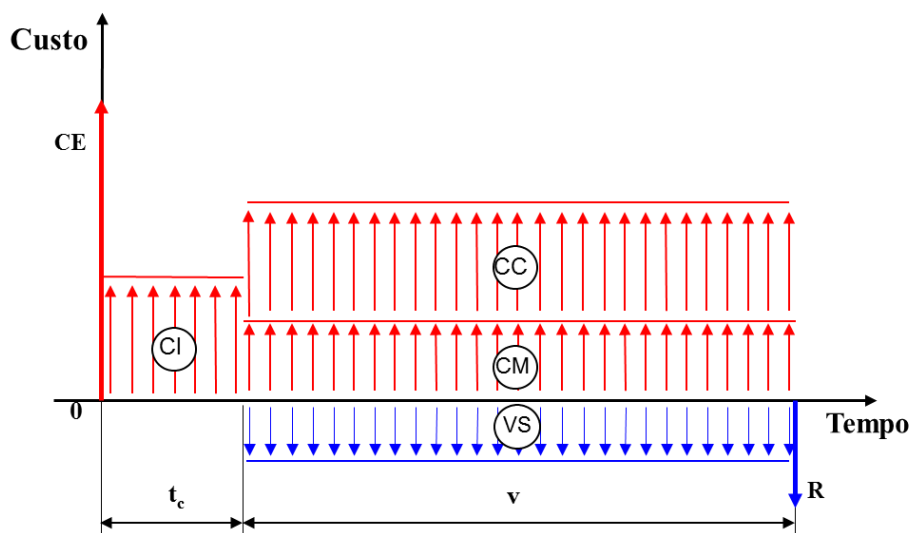


Figura 11 - Fluxo de Caixa de um Empreendimento Energético Genérico

Segundo Carvalho, para trabalhar com essa metodologia, esse modelo será transformado em um custo unitário podendo ser calculado para vida infinita, o que vai ajudar na determinação do custo-benefício da planta.

6.1.1 DEFINIÇÃO DE VIDA ÚTIL EFETIVA

A definição de vida útil da usina como um sistema único de geração de energia é imprecisa. De um lado temos uma etapa que trabalha apenas com o lixo, uma matéria prima muito corrosiva, e do outro lado duas etapas que trabalham a quente, a altas temperaturas de trabalho. Encontra-se muito frequentemente uma definição de vida útil bem consolidada para usinas termoeletricas, mas para usinas de produção de CDR não há precisão e nem segurança no dado.

No Estudo de Vida Útil Econômica e Taxa de Depreciação da ANEEL, explica-se que a vida útil desses equipamentos (que operam com resíduos) varia muito de acordo com a classe de utilização, a qualidade do projeto, a operação bem realizada e principalmente a manutenção adequada. Em termos de valores médios, pode-se considerar a vida útil da armazenagem, manipulação e transporte de resíduo como sendo 15 anos.

De acordo com CASTRO (2000) e PINHEL (2000) o período de 20 anos é considerado como o da vida útil de um projeto de usina termelétrica.

Dessa forma no presente trabalho o mesmo valor de 15 anos será utilizado, tendo em consideração que não se tem valores precisos e consolidados para a planta estudada, será mantido o conservadorismo, tendo em vista que quanto menor a vida útil, maior o custo do projeto e menos viável este será.

6.1.2 INVESTIMENTO INICIAL

Para o levantamento desse valor elaborou-se as Tabela 6 e Tabela 7 com informações cedidas por fornecedores, no caso dos equipamentos, e para outros valores foram consultados órgãos públicos e empresas de projeto. Os valores fornecidos incluem todas as despesas com transporte, instalação, adequação do equipamento, impostos e outros custos.

No Investimento Inicial estão contidos os Custos de Instalação (CI) e do Equipamento (CE). Os valores relativos às licenças e estudos são referentes a valores médios para projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas, tendo em vista que não há regulamentação consolidada no País em relação ao reaproveitamento energético do lixo.

Tabela 6 - Investimento Inicial Cenário 1

Investimento Inicial - CENÁRIO 1

Taxa de Câmbio

R\$ 3,71

Item	Descrição	Quantidade	Valor unitário	Valor	Tempo (Ano)	Valor em Dólar
Prospecção			R\$ 1.763.700,00	R\$ 1.942.700,00		\$ 523.638,81
	Criação de LTDA	1	R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00	0,5	\$ 269,54
	Formação de Equipe	1	R\$ 415.200,00	R\$ 415.200,00	2	\$ 111.913,75
	Viagem para conhecer Fornecedores	5	R\$ 42.000,00	R\$ 210.000,00	2	\$ 56.603,77
	Estudos preliminares dos Resíduos	3	R\$ 5.500,00	R\$ 16.500,00	2	\$ 4.447,44
	Elaboração de Projeto Básico	1	R\$ 300.000,00	R\$ 300.000,00	1	\$ 80.862,53
	Criação de Protótipos	1	R\$ 1.000.000,00	R\$ 1.000.000,00	1	\$ 269.541,78
Projeto			R\$ 1.100.000,00	R\$ 1.850.000,00		\$ 498.652,29
	Estudos Ambientais	4	R\$ 200.000,00	R\$ 800.000,00	1	\$ 215.633,42
	Estudos Técnicos	2	R\$ 150.000,00	R\$ 300.000,00	1,5	\$ 80.862,53
	Elaboração de Projeto Mecânico	1	R\$ 300.000,00	R\$ 300.000,00	1,2	\$ 80.862,53
	Elaboração de Projeto Eletro-Mecânico	1	R\$ 150.000,00	R\$ 150.000,00	1	\$ 40.431,27
	Elaboração de Projeto Integrador	1	R\$ 150.000,00	R\$ 150.000,00	0,8	\$ 40.431,27
	Elaboração de Projeto Civil	1	R\$ 150.000,00	R\$ 150.000,00	0,5	\$ 40.431,27
Licenças			R\$ 59.000,00	R\$ 141.000,00		\$ 38.005,39
	Estudos complementares	2	R\$ 10.000,00	R\$ 20.000,00	0,5	\$ 5.390,84
	Elaboração de Relatórios	4	R\$ 20.000,00	R\$ 80.000,00	0,5	\$ 21.563,34
	Taxas de Licença Prévia	2	R\$ 12.000,00	R\$ 24.000,00	0,5	\$ 6.469,00
	Taxas de Licença de Operação	1	R\$ 12.000,00	R\$ 12.000,00	0,5	\$ 3.234,50
	Taxas de Licença de Instalação	1	R\$ 5.000,00	R\$ 5.000,00	0,5	\$ 1.347,71
Equipamentos			R\$ 6.699.085,00	R\$ 6.699.085,00		\$ 1.805.683,29
	Linha de CDR 400 ton/dia	1	R\$ 5.929.085,00	R\$ 5.929.085,00	2	\$ 1.598.136,12
	Gaseificador	1	R\$ 700.000,00	R\$ 700.000,00	2	\$ 188.679,25
	Caldeira	1	R\$ 40.000,00	R\$ 40.000,00	0,5	\$ 10.781,67
	Turbina	1	R\$ 10.000,00	R\$ 10.000,00	0,5	\$ 2.695,42
	Central de Comando	1	R\$ 10.000,00	R\$ 10.000,00	0,5	\$ 2.695,42
	Ponte Rolante	1	R\$ 10.000,00	R\$ 10.000,00	0,1	\$ 2.695,42
Terreno			R\$ 2.500.000,00	R\$ 2.500.000,00		\$ 673.854,45
	Valor do Terreno	1	R\$ 2.500.000,00	R\$ 2.500.000,00	0	\$ 673.854,45
Construção Civil			R\$ 3.400.000,00	R\$ 3.400.000,00		\$ 916.442,05
	Fundação	1	R\$ 100.000,00	R\$ 100.000,00	2	\$ 26.954,18
	Galpão 800mx500m	1	R\$ 800.000,00	R\$ 800.000,00	1,7	\$ 215.633,42
	Pavimentação	1	R\$ 2.500.000,00	R\$ 2.500.000,00	1	\$ 673.854,45
TOTAL			R\$ 15.521.785,00	R\$ 16.532.785,00		\$ 4.456.276,28

Tabela 7 - Investimento Inicial Cenário 2

Investimento Inicial - CENÁRIO 2

Taxa de Câmbio

R\$ 3,71

Item	Descrição	Quantidade	Valor unitário	Valor	Tempo (Ano)	Valor em Dólar
Prospecção			R\$ 1.763.700,00	R\$ 1.942.700,00		\$ 523.638,81
	Criação de LTDA	1	R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00	0,5	R\$ 269,54
	Formação de Equipe	1	R\$ 415.200,00	R\$ 415.200,00	2	\$ 111.913,75
	Viagem para conhecer Fornecedores	5	R\$ 42.000,00	R\$ 210.000,00	2	\$ 56.603,77
	Estudos preliminares dos Resíduos	3	R\$ 5.500,00	R\$ 16.500,00	2	\$ 4.447,44
	Elaboração de Projeto Básico	1	R\$ 300.000,00	R\$ 300.000,00	1	\$ 80.862,53
	Criação de Protótipos	1	R\$ 1.000.000,00	R\$ 1.000.000,00	1	\$ 269.541,78
Projeto			R\$ 1.200.000,00	R\$ 2.250.000,00		\$ 606.469,00
	Estudos Ambientais	4	R\$ 300.000,00	R\$ 1.200.000,00	1	\$ 323.450,13
	Estudos Técnicos	2	R\$ 150.000,00	R\$ 300.000,00	1,5	\$ 80.862,53
	Elaboração de Projeto Mecânico	1	R\$ 300.000,00	R\$ 300.000,00	1,2	\$ 80.862,53
	Elaboração de Projeto Eletro-Mecânico	1	R\$ 150.000,00	R\$ 150.000,00	1	\$ 40.431,27
	Elaboração de Projeto Integrador	1	R\$ 150.000,00	R\$ 150.000,00	0,8	\$ 40.431,27
	Elaboração de Projeto Civil	1	R\$ 150.000,00	R\$ 150.000,00	0,5	\$ 40.431,27
Licenças			R\$ 59.000,00	R\$ 141.000,00		\$ 38.005,39
	Estudos complementares	2	R\$ 10.000,00	R\$ 20.000,00	0,5	\$ 5.390,84
	Elaboração de Relatórios	4	R\$ 20.000,00	R\$ 80.000,00	0,5	\$ 21.563,34
	Taxas de Licença Prévia	2	R\$ 12.000,00	R\$ 24.000,00	0,5	\$ 6.469,00
	Taxas de Licença de Operação	1	R\$ 12.000,00	R\$ 12.000,00	0,5	\$ 3.234,50
	Taxas de Licença de Instalação	1	R\$ 5.000,00	R\$ 5.000,00	0,5	\$ 1.347,71
Equipamentos			R\$ 11.392.323,99	R\$ 11.392.323,99		\$ 3.070.707,27
	Linha de CDR 1200 ton/dia	1	R\$ 10.562.323,99	R\$ 10.562.323,99	2	\$ 2.846.987,60
	Gaseificador	1	R\$ 750.000,00	R\$ 750.000,00	2	\$ 202.156,33
	Caldeira	1	R\$ 50.000,00	R\$ 50.000,00	0,5	\$ 13.477,09
	Turbina	1	R\$ 10.000,00	R\$ 10.000,00	0,5	\$ 2.695,42
	Central de Comando	1	R\$ 10.000,00	R\$ 10.000,00	0,5	\$ 2.695,42
	Ponte Rolante	1	R\$ 10.000,00	R\$ 10.000,00	0,1	\$ 2.695,42
Terreno			R\$ 3.000.000,00	R\$ 3.000.000,00		\$ 808.625,34
	Valor do Terreno	1	R\$ 3.000.000,00	R\$ 3.000.000,00	0	\$ 808.625,34
Construção Civil			R\$ 3.900.000,00	R\$ 3.900.000,00		\$ 1.051.212,94
	Fundação	1	R\$ 100.000,00	R\$ 100.000,00	2	\$ 26.954,18
	Galpão 800mx500m	1	R\$ 800.000,00	R\$ 800.000,00	1,7	\$ 215.633,42
	Pavimentação	1	R\$ 3.000.000,00	R\$ 3.000.000,00	1	\$ 808.625,34
Total			R\$ 40.866.347,98	R\$ 43.309.347,98		\$ 6.098.658,76

6.1.3 CUSTO ANUAL DO INSUMO ENERGÉTICO – CC

O Insumo Energético, no caso o Lixo, na verdade não consta como um custo e sim como uma receita. Portanto, para a análise de Custo/Benefício será considerado o custo zero, porém para a análise do tempo de recuperação do investimento será contabilizado.

Utilizou-se a mesma tarifa de tratamento paga por tonelada para aterro sanitário no território nacional. No Brasil pratica-se a Tarifa de Destinação Final (TDF) na ordem de R\$ 40,00 por tonelada

de lixo (RIBEIRO, 2010). Esse valor é independente da qualidade do combustível. Tarifa é um preço público cobrado por um serviço prestado de forma facultativa, é referente ao serviço prestado de dar destinação final ao Resíduo Sólido Urbano, que após coleta deve ser depositado em algum lugar. Este é um valor fixo pago pelas Prefeituras em contrato de concessão. Por ser um valor consolidado no mercado não será necessário utilizar o cálculo para estimar esse valor comparado com o valor da energia produzida, fator de capacidade e o rendimento das instalações. Considerando o Cenário 1, no qual são projetados os equipamentos para o recebimento de 400 t/dia, o que significa, 146.000 toneladas por ano, a um valor de R\$ 40,00 reais por tonelada, a um câmbio de R\$ 3,71 por cada Dólar. A Tabela 8 mostra o detalhamento.

Tabela 8 - Custo do Combustível por Ano

Cenário 1		Cenário 2	
Toneladas por dia	400	Toneladas por dia	1200
Dias no ano	365	Dias no ano	365
Toneladas por ano	146000	Toneladas por ano	438000
TDF	R\$ 40,00	TDF	R\$ 40,00
TDF em Dólar	\$ 10,78	TDF em Dólar	\$ 10,78
CC (US\$/ANO)	1.574.123,99 US\$/ano	CC (US\$/ANO)	4.722.371,97 US\$/ano

$$CC_1 = 1.574.123,99 \text{ US$/ano}$$

$$CC_2 = 4.722.371,97 \text{ US$/ano}$$

6.1.4 CUSTO ANUAL DE MANUTENÇÃO - CM

Manutenções são cuidados técnicos indispensáveis ao funcionamento correto e duradouro do maquinário. Esses cuidados envolvem a conservação, a adequação, a restauração, a substituição e a prevenção.

De modo geral, a manutenção em uma empresa tem como objetivos:

- Manter equipamentos e máquinas em condições de pleno funcionamento para garantir a operação dentro dos limites de projeto;
- Prevenir prováveis falhas ou quebras dos elementos das máquinas.

Alcançar esses objetivos requer manutenção diária em serviços de rotina e de reparos periódicos programados (ALMEIDA, 2006).

Basicamente existem dois tipos de manutenções que são feitas ao longo da vida de uma usina, equipamento, edificação e outros, as manutenções preventivas e as corretivas. Os nomes são autoexplicativos.

Manutenção preventiva: trata-se de atuação realizada de maneira a reduzir ou evitar a falha ou a queda no desempenho do equipamento, obedecendo a um plano de manutenção preventiva previamente elaborada, baseado em intervalos definidos de tempo, isto é manutenção baseada no tempo. A manutenção preventiva é considerada como o ponto de apoio das atividades de manutenção, envolvendo tarefas sistemáticas tais como: as inspeções, substituição de peças e reformas (PATTON JR., 1983).

Manutenção Corretiva: trata-se da atuação realizada para reparar defeitos inesperados. Visa corrigir, restaurar, recuperar a capacidade produtiva do maquinário, que tenha cessado ou diminuído sua capacidade de exercer as funções às quais foi projetado. Tendo em vista que uma máquina parada compromete toda a produção, a manutenção corretiva é a primeira atitude tomada para que esta produção volte à normalidade. Ou seja, a manutenção corretiva é uma técnica de gerência reativa que espera pela falha da máquina ou equipamento, antes que seja tomada qualquer ação de manutenção. Além disso, é o método mais caro de gerência de manutenção. Além de contribuir para a diminuição da vida útil das máquinas

O levantamento de custos com a manutenção planejada é de fácil obtenção, pois a mesma segue rotinas com periodicidades e custos programados. Por outro lado, a manutenção não planejada, por se tratar de fato inesperado, não possibilita uma previsão exata de gastos.

Neste valor de manutenção será acoplado o custo de operação da fábrica, pois não existe nenhum dado disponível de valores relativos à operação de uma usina como esta.

O custo de manutenção pode ser estimado como sendo um custo fixo, proporcional ao do investimento inicial, por ano de operação. Para os dois cenários temos o custo específico de operação e manutenção de 20% do valor do investimento inicial, mais uma vez, esse valor é estimado, devido ao não conhecimento dos valores precisos. A Tabela 9 mostra os valores em Dólar/ano.

Tabela 9 - Custo de Manutenção

Cenário 1		Cenário 2	
CM (US\$/ANO)	891.255,26	CM (US\$/ANO)	1.219.731,751

6.1.5 VALOR ANUAL DO SUBPRODUTO – VS

No caso do estudo que se segue, temos duas fontes de renda e custo para os subprodutos, como já descritos anteriormente. A venda de metais ferrosos e não ferrosos e o custo de deposição final de materiais não processados. Usando como base, apenas para elaboração do cálculo do subproduto a Tabela 10 mostra a composição Gravimétrica Nacional em 2011.

Tabela 10 - Composição Gravimétrica Nacional

Material	Participação (%)
Metais	2,9
Papel, Papelão e TetraPak	13,1
Plástico	13,5
Vidro	2,4
Matéria Orgânica	51,4
Outros	16,7
TOTAL	100,0

Fonte: Pesquisa ABRELPE 2011 e Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Versão pós Audiências e Consulta Pública para Conselhos Nacionais (Fevereiro/2012)

A hipótese de que o Valor do Subproduto seja proporcional à energia anual produzida é bastante realista na maioria dos casos. Porém, pelo fato de haver despesas e receitas, optou-se por discriminar esse valor e obter um valor mais próximo do real. O Valor Anual do Subproduto deve também conter valores ambientais e sociais. No caso, a usina retira o ‘emprego’ dos catadores, principalmente informais, do ramo de catação. O que inicialmente pode parecer um impacto negativo, pois as pessoas estariam perdendo sua fonte de renda, mas na verdade, a catação de lixo é um emprego sub-humano e não deve ser realizado por pessoa alguma. Com a usina, outro ganho é o ambiental, tendo em vista que com a redução do material em 6% de todo o RSU que iria para o aterro, a vida útil do aterro aumentará em 1666%. A criação de novos aterros que ocupam espaços que poderiam servir de moradia, ou plantação ou qualquer outra atividade que não seja a do lixo. A utilização de termoeletrônica para geração de energia, com inerente exaustão de CO₂ para o meio ambiente, surge como um impacto positivo, pois o CO₂, ao contrário do CH₄ é menos agressivo para o meio ambiente, é 21 vezes menos poderoso do que o metano no processo de aquecimento Global e não é considerado um Gás de Efeito Estufa – GEE. Portanto, será vendido no valor de 10,00 US\$ no comércio de crédito de carbono. Valor condizente com a realidade brasileira de venda dessa mercadoria.

Usando a citação de Henriques et al, 2002:

“Utilizando-se a metodologia do IPCC (1996) para cálculo do metano, obtém-se que a cada tonelada de lixo, com a composição típica brasileira, emite-se 6,5% de metano. (...). Isto significa que cada tonelada de lixo, disposta em aterro sem recuperação e tratamento do biogás, emite 1,3 tonelada de dióxido de carbono equivalente. ”

Portanto, o valor que deve ser vendido é aquela quantidade de metano que não será lançada no meio ambiente, para o cenário 1, 26 toneladas por dia e 9490 toneladas de CH₄ por ano. Para o cenário 2,78

toneladas por dia e 28.470 toneladas de CH₄ por ano. A Tabela 11 descreve os valores associados ao subproduto.

Tabela 11 - Custos e Receitas do Subproduto

Subproduto	%	Cenário 1 (ton/ano)	Cenário 2 (ton/ano)	Valor Unitário (Por Kg)	Valor Total Cenário 1 (US\$/ano)	Valor Total Cenário 2 (US\$/ano)
Metais	2,3%	3387200	10161600	\$ 0,0943	\$ 319.547,17	\$ 958.641,51
Vidro	1,9%	2803200	8409600	\$ 0,0323	\$ 90.669,54	\$ 272.008,63
Cinzas	1,0%	1460000	4380000	\$ -0,0054	\$ -7.870,62	\$ -23.611,86
Outros inertes	5,0%	7300000	21900000	\$ -0,0054	\$ -39.353,10	\$ -118.059,30
Fim dos catadores	-	-	-	\$ 500,00	\$ 10.000,00	\$ 30.000,00
Redução da Construção de novos aterros	-	-	-	-	\$ 117.391,30	\$ 201.188,06
CH ₄ /CO ₂	-	-	-	\$ 0,0100	\$ 94,90	\$ 284,70
Total					\$ 490.479,19	\$ 1.320.451,73

* “O custo para o SUS no tratamento dessas doenças (referência a doenças causadas pelo lixo adquiridas pelos catadores) é de US\$ 500 por pessoa”

Os valores de venda de materiais recicláveis foram colhidos em material bibliográfico, e é atualizado para o ano de 2014. Será aplicado um fator de 80% relativo a eficiência da separação dos Metais e Vidros.

O custo do Fim dos Catadores é uma tarefa complexa de se avaliar, decidiu-se verificar quanto que os catadores custariam para o governo. O tratamento de doenças relacionadas ao descarte inadequado do lixo pode custar US\$ 370 milhões por ano ao sistema de saúde pública do Brasil, de acordo com estudo que avaliou o impacto dos mais de 3 mil lixões do país sobre a saúde o meio ambiente. Estudo realizado pela International Solid Waste Association (ISWA), em parceria com o Sindicato das Empresas de Limpeza Urbana e com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza. Não foi encontrado a quantidade de catadores por tonelada de lixo desejada por dia em aterros ou lixões, atribuiu-se 20 catadores para o Cenário 1 e 60 para o Cenário 2.

Os valores encontrados para a redução da construção de novos aterros é referente ao investimento inicial de um aterro sanitário, como exemplo e referência foi utilizado a região do Vale do Aço, com aproximadamente 400 toneladas diárias de RSM recebidas. Para obtenção dos custos para 750 mil habitantes, referente ao Cenário 1, utilizou-se o coeficiente de variação maior da série. O mesmo para o Cenário 2.

Tabela 12 - Análise estatística do custo de implantação de Aterro Sanitário

População (habitantes)	Custo médio (R\$)	Desvio- padrão	Coefficiente de variação (%)
10.000	1.802.479,89	24.360,37	1,35
30.000	3.008.219,57	31.971,47	1,06
50.000	4.128.594,99	38.444,70	0,93
100.000	4.439.807,66	44.472,99	1,00
150.000	5.850.909,87	49.681,39	0,85
200.000	6.817.401,59	73.852,25	1,08
250.000	7.460.204,21	65.156,83	0,87

Fonte: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES

O custo total foi dividido pela vida útil de um aterro, com base em no mesmo aterro sanitário, que tem capacidade para aproximadamente 2,11 milhões toneladas, assumindo que a mistura relativa de RSU e resíduos inertes continuará sendo a mesma. Dadas às taxas de disposição históricas e uma taxa de crescimento futuro de 2%, o aterro alcançará a sua capacidade máxima em 2025, sendo que teve início de operação em 2003, resultando em uma vida útil de 23 anos. As Tabela 13 e Tabela 14 mostram as quantidades de Resíduos depositados no Aterro do Vale do Aço, com 400 ton/dia.

Tabela 13 - Disposição de RSU – Aterro Sanitário do Vale de Aço

Ano	Tonelagem Disposta (t/Ano)	Tonelagem Acumulada (t)	Comentários
2003	13.300	13.300	Informado na estação de pesagem
2004	45.730	59.030	Informado na estação de pesagem
2005	64.200	123.230	Informado na estação de pesagem
2006	82.710	205.940	Informado na estação de pesagem
2007	85.250	291.190	Informado na estação de pesagem
2008	84.850	376.040	Informado na estação de pesagem
2009	88.920	464.960	Informado na estação de pesagem
2010	92.360	557.320	Projetado com base nos dados de disposição até abril de 2010
2011	94.210	651.530	Projetado com o uso de aumento

Fonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM

Tabela 14 - Estimativas de Disposição de RSU – Aterro Sanitário do Vale de Aço

Ano	Tonelagem Disposta (t/Ano)	Tonelagem Acumulada (t)	Comentários
2012	96.090	747.620	de taxa anual de disposição de 2,0%
2013	98.010	845.630	
2014	99.970	945.600	
2015	101.970	1.047.570	
2016	104.010	1.151.580	
2017	106.090	1.257.670	
2018	108.210	1.365.880	
2019	110.370	1.476.250	
2020	112.580	1.588.830	
2021	114.830	1.703.660	
2022	117.130	1.820.790	
2023	119.470	1.940.260	
2024	121.860	2.062.120	
2025	49.880	2.112.000	

Fonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM

A análise para o Cenário 2 foi equivalente, levando em consideração os mesmos 23 anos de vida útil do Aterro Sanitário.

6.1.6 VALOR ANUAL DE DESTINAÇÃO E CUSTO DE SEGURO

Tendo em vista que o processo gera resíduos, que devem ter destinação adequada, o custo de destinação será contabilizado a fim de aprimorar o modelo. As cinzas e outros inertes constam como rejeitos a serem despejados em aterro sanitário comum, ao custo de R\$ 40,00 por tonelada.

O custo de seguro, entretanto, é apenas um valor que deverá ser pago a fim de proteger a usina de grandes acidentes.

De maneira a sintetizar e ilustrar os custos associados foram elaborados fluxos de caixas visuais. As tabelas Tabela 15 e Tabela 16 mostram resumidamente os valores usados para a montagem do Fluxo de Caixa do Cenário 1 e 2. As Figura 12 e Figura 13 representam os fluxos de caixa do cenário 1 e 2, respectivamente.

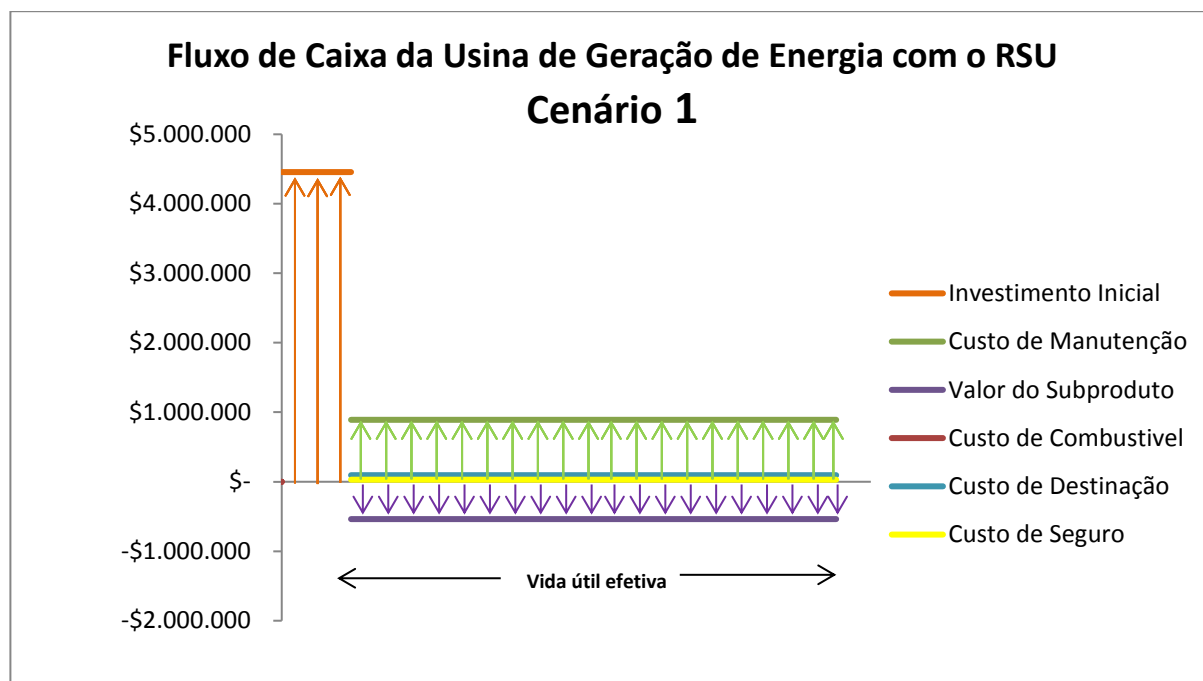


Figura 12 - Fluxo de Caixa - Cenário 1

Tabela 15 - Valores para o Fluxo de Caixa - Cenário 1

Cenário 1	
Investimento Inicial	\$ 4.456.276,28
Custo de Combustível	\$ -
Custo de Manutenção	\$ 891.255,26
Valor do Subproduto	\$ -537.702,91
Custo de Destinação	\$ 94.447,44
Custo de Seguro	\$ 29.478,43

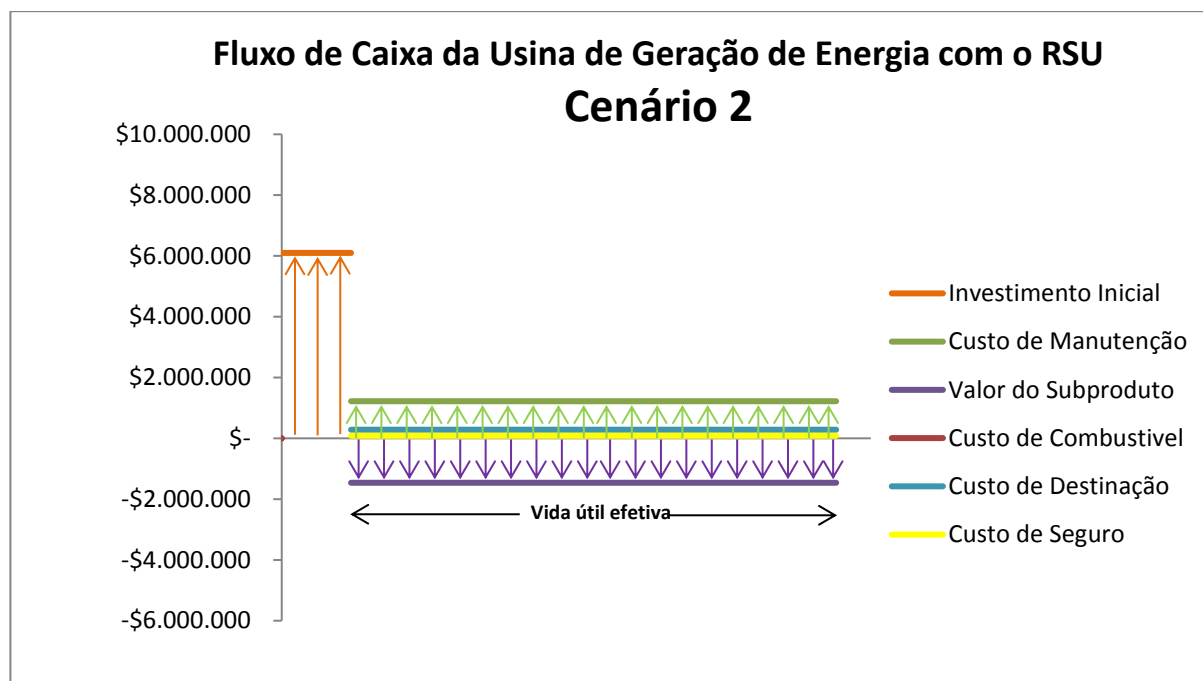


Figura 13 - Fluxo de Caixa - Cenário 2

Tabela 16 - Valores para o Fluxo de Caixa - Cenário 2

Cenário 2	
Investimento Inicial	\$ 6.098.658,76
Custo de Combustível	\$ -
Custo de Manutenção	\$ 1.219.731,75
Valor do Subproduto	\$ -1.462.122,89
Custo de Destinação	\$ 283.342,32
Custo de Seguro	\$ 83.522,21

6.1.7 VALOR RESIDUAL R

Por se tratar de uma matéria prima extremamente corrosiva, duplas jornadas de trabalho e desconhecimento de como será o estado do maquinário após o término da vida útil da usina, será considerado o valor nulo para o valor residual, para ambos os cenários.

6.1.8 PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA

A energia produzida na Usina WTE por ano será igual à Potência Instalada - PI, em [kW], vezes o número de horas de um ano, vezes o fator de capacidade da planta como um todo.

Para determinação da potência instalada levam-se em consideração os seguintes fatos.

$$PI = PCI * \frac{CDR}{h} * \eta_{gas} * C * \eta_{ute} - consumo da planta \quad (2)$$

Sendo, PCI a energia contida no CDR proveniente do RSU, CDR/h a vazão mássica do combustível, η_{gas} é a eficiência do gaseificador, $\mathcal{C}$ é uma constante para conversão de medidas, η_{ute} é a eficiência da unidade termoeletrica (caldeira e turbina) e consumo da planta é o consumo interno da usina WTE.

O fator de capacidade da planta é de 85%, pois a UTE permanece ligada independentemente da produção de CDR. Esses 15% representariam as pausas para manutenções corretivas e preventivas.

Portanto, a energia produzida - En em [kWh/ano] será:

$$En_1 = 30.535.360 \text{ KWh/ano}$$

$$En_2 = 118.279.764 \text{ KWh/ano}$$

6.1.9 CUSTO DISTRIBUÍDO TOTAL CD_{Total}

Esse custo distribuído no tempo envolve os custos já definidos de manutenção, de operação, de combustíveis, valor de subproduto, custos ambientais, custo social e Investimento Inicial. Considerando reposições sucessivas por um tempo n infinito, a expressão ao limite de quando n tende a infinito (para $i > 0$) e se obtém:

$$CD_{Total} = \left(CM - VS + I \cdot i + \left(\frac{I \cdot i}{(1+i)^n - 1} \right) \right) \quad (3)$$

6.1.10 TEMPO DE RECUPERAÇÃO DO INVESTIMENTO

Indica o prazo de tempo necessário para que os desembolsos sejam integralmente recuperados, corrigidos pela taxa de juros da SELIC.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) aprovou o edital do leilão de energia nova para entrega a partir de 2020 e o preço-teto da energia para usinas termelétricas ficou em R\$ 281 por megawatt-hora (MWh). Porém, o preço-teto estabelecido para o Leilão regulado A-3, que acontecerá no dia 21/08, contratando energia para suprimento a partir de 2018, foi estabelecido em R\$ 218/MWh para a fonte biomassa. O edital do Leilão e o preço-teto foram aprovados no dia 21/07, durante a reunião da diretoria da Agência Nacional de Energia Elétrica.

Por isso, será usado o menor valor de venda de energia, para garantir a segurança. Por meio da equação descrita será calculado o tempo de recuperação de investimento para ambos os cenários.

$$T = - \frac{\ln\left(1 - \frac{I \cdot i}{B}\right)}{\ln(1+i)} \quad (4)$$

Sendo B o valor relativo às receitas com venda de energia e a Tarifa de Destinação Final paga pelas Prefeituras pelo recebimento do Resíduo Sólido Urbano, já descrito na 6.1.3, menos o Custo Distribuído Total. A Tabela 17 mostra o tempo em anos da recuperação de cada cenário.

Tabela 17 - Tempo de Recuperação de Investimento

	Cenário 1	Cenário 2
Tempo de recuperação	1,81	0,51

6.1.11 AVALIAÇÃO CUSTO/BENEFÍCIO

Esse indicador avalia o custo da energia produzida ao ano, e tem a vantagem adicional de permitir uma comparação direta com os preços da energia praticados pelas concessionárias de energia elétrica. É por meio deste indicador que será possível avaliar se para ambos os cenários

$$C/B = \left(CM + CD + CS - VS + I \cdot i + \left(\frac{I \cdot i}{(1+i)^v - 1} \right) \right) \frac{1}{En} \quad (5)$$

- C/B é a relação Custo/Benefício em [US\$/kWh]
- CM é o Custo de Manutenção Específico em [US\$/ano]
- CD é o Custo de Destinação Final Específico em [US\$/ano]
- CS é o Custo de Seguro Específico em [US\$/ano]
- VS é o Valor do Subproduto Específico em [US\$/ano]
- I é o investimento inicial em [US\$]
- FC é o Fator de Capacidade Energia
- v é a vida [anos]
- En é a Energia Produzida em [kWh/ano]
- i é a taxa de juros [aa]

Os valores de CM, CC, CD, CS, VC, I e En já foram calculados nos capítulos anteriores. A taxa de juros é a taxa SELIC para novembro de 2015, contabilizada em 14,15%. A vida é a vida útil efetiva, de 15 anos.

Para o Cenário 1 e 2 foram compilados os dados e o resultado está descrito na Tabela 18 com suas respectivas unidades.

Tabela 18 - Dados dos Cenários

	Cenário 1	Cenário 2	Unidade
Quantidade de RSU entregues diariamente	400	1200	ton/dia
Nº médio de habitantes geradores de RSU	375 mil	1.100 milhões	-
KWh produzidos em um ano	30.535.360,59	118.279.764,02	kWh/ano
Custo de Manutenção	\$ 891.255,26	\$ 1.219.731,75	US\$/ano
Custo de Seguro	\$ 29.478,43	\$ 83.522,21	US\$/ano
Custo de Destinação	\$ 94.447,44	\$ 283.342,32	US\$/ano
Custo do Combustível	\$ -	\$ -	US\$/ano
Valor do Subproduto	\$ 537.702,91	\$ 1.462.122,89	US\$/ano
Investimento Inicial	\$ 4.456.276,28	\$ 6.098.658,76	US\$
Taxa de Juros	14,15%	14,15%	-
Vida Útil Efetiva	15	15	Anos
Custo/Benefício	0,036287	0,008348	US\$/kWh
Tempo de recuperação	2,47	0,64	Anos

6.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Segundo Carvalho (2006), para uma determinada tecnologia e um determinado cenário econômico, a Análise de Sensibilidade consiste em relacionar a variação da relação C/B causada pela perturbação de determinado parâmetro que compõe o custo. Esta análise consiste em variar os resultados dos indicadores.

Com o objetivo de determinar o grau de variação dos resultados e dos indicadores de viabilidade da planta de geração de energia com o RSU em face das alterações nas variáveis relevantes na análise de custo benefício. A análise de sensibilidade então permite montar curvas para verificação do ponto ótimo de viabilidade de acordo com as variações nos indicadores.

Nesse estudo será apresentado o estudo de análise de sensibilidade para os parâmetros de Custos de manutenção, PCI do Combustível e Fator de Capacidade da Planta para o Custo/Benefício.

Os valores serão comparados a outras tecnologias, encontrados na bibliografia, e estão contidos na Tabela 19.

Tabela 19 - Custo Médio de Geração

Custo médio de Geração	
Eólica	0,075 US\$/kWh
Heliotermica	0,168 US\$/kWh
Hidráulica (PCH 1)	0,0369 US\$/kWh
Hidráulica (PCH 2)	0,0583 US\$/kWh

1. Custos de Manutenção

Como previsto, os custos de manutenção são importantes fatores para avaliar a viabilidade da planta. O valor do Custo/Benefício para o Cenário 1 é interessante até o percentual de 20% em relação a geração hídrica e até 45% do valor de investimento inicial em comparação com a Eólica. Está descrita na Figura 14 a curva. A viabilidade vai diminuindo conforme o valor de manutenção vai aumentando.

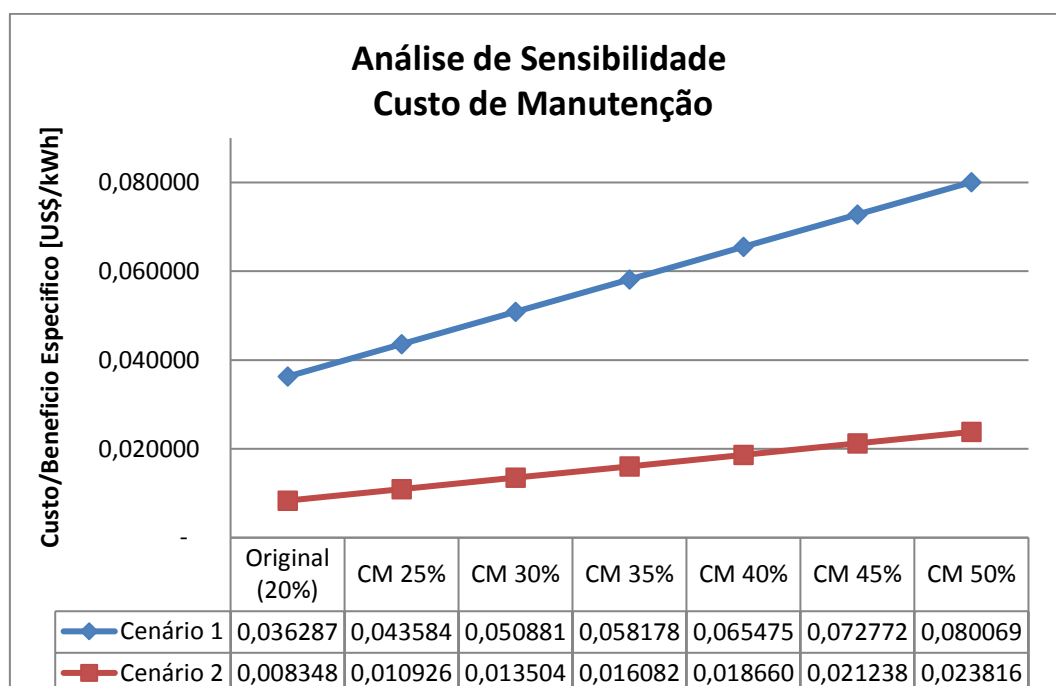


Figura 14 – Gráfico da Análise de Sensibilidade do Custo/Benefício da Planta de Geração de Energia em relação aos seus Custos de Manutenção

2. Poder Calorífico dos Resíduos

O Poder Calorífico Inferior dos resíduos são de suma importância para análise do custo da energia gerada. Quanto mais pobre o lixo, menos rentável será seu empreendimento. A variação descrita na Figura 15 é muito interessante, pois o PCI dos resíduos varia tanto de cidade para cidade, como de ano para ano. E com essa análise é possível identificar então qual é o limite mínimo que o RSU deve conter de energia para avaliar se vale ou não investir no empreendimento.

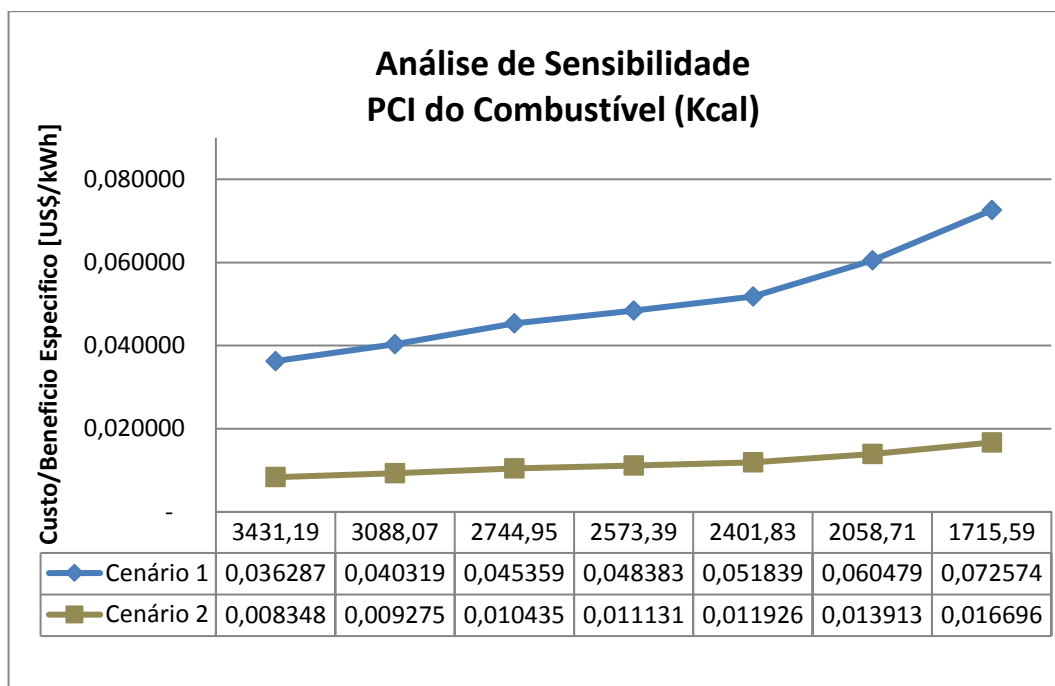


Figura 15 – Gráfico da Análise de Sensibilidade do Custo/Benefício da Planta de Geração de Energia em relação ao Poder Calorífico Inferior dos Resíduos

3. Fator de Capacidade da Planta

O Fator de Capacidade mede o percentual relativo de funcionamento da Usina em relação a todo o tempo. A Figura 16 mostra o esperado para modelo, quanto menos tempo a usina gerar energia, mais caro será o combustível.

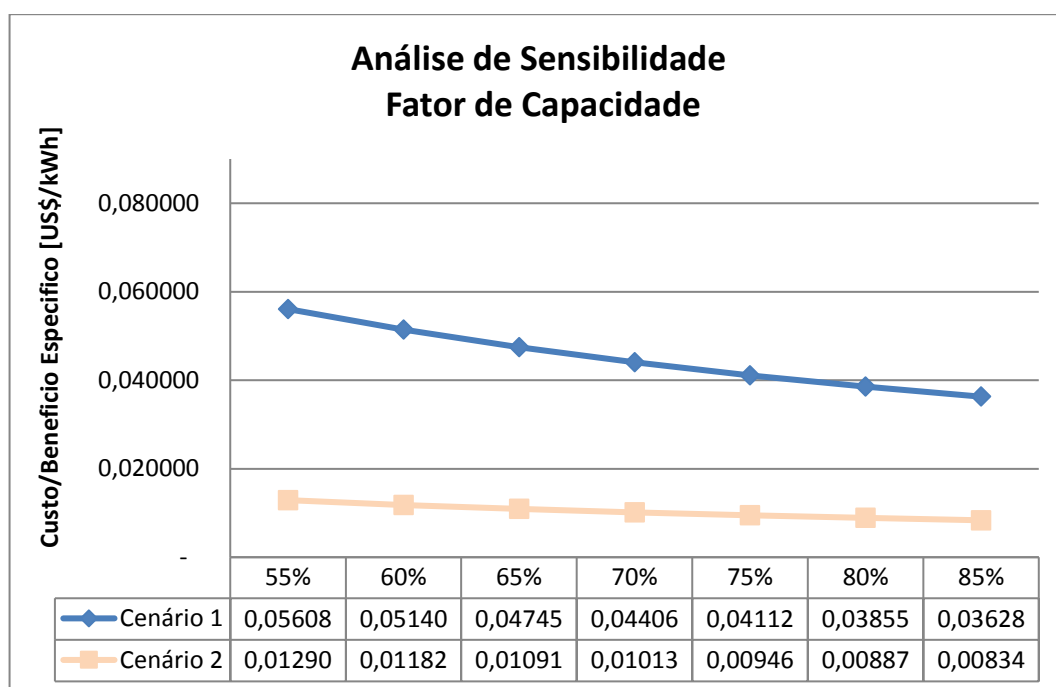


Figura 16 – Gráfico da Análise de Sensibilidade do Custo/Benefício da Planta de Geração de Energia em relação ao Fator de Capacidade da Planta

E os parâmetros de valor de venda da energia e da Receita para o tempo de retorno.

4. Valor de Venda de Energia

A Figura 17 mostra a dependência do fator tempo de pagamento com o valor da venda de energia. Já esperado também. Até com o menor valor de venda de Energia, a R\$ 138,00 o tempo de recuperação de investimento está excelente. Uma termoeletrônica convencional tem aproximadamente 7 anos de tempo para recuperar.

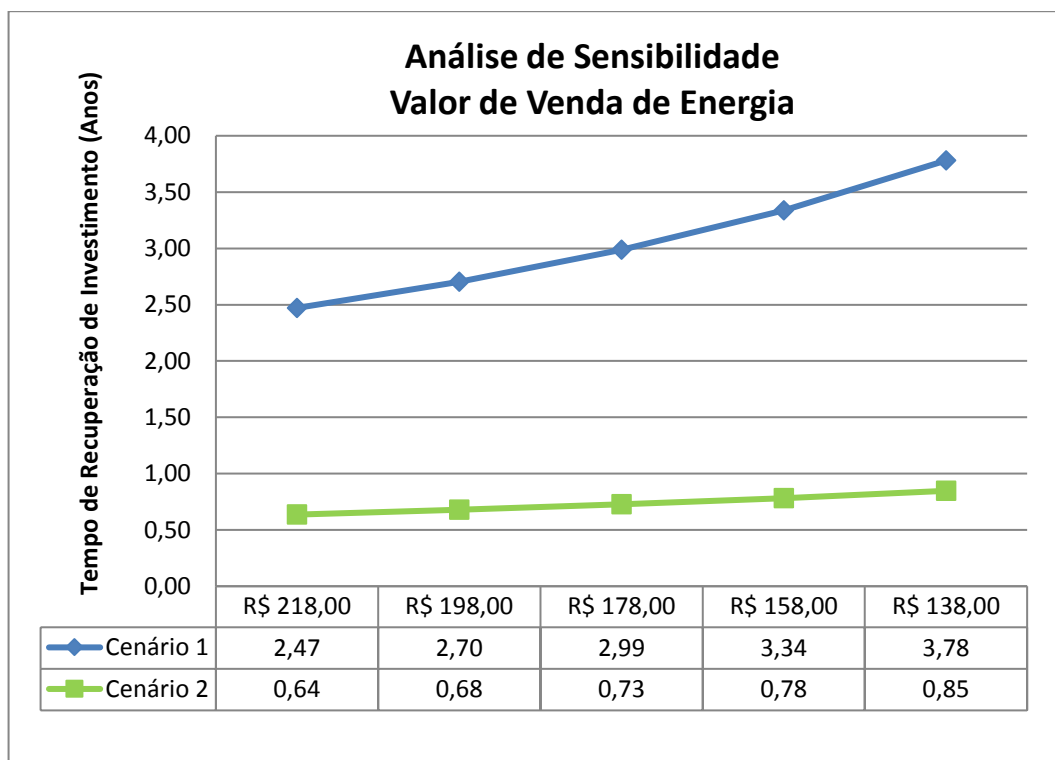


Figura 17 - Gráfico do Tempo de Retorno do Investimento em Relação a variação do Valor da Venda de Energia

5. Receita de TDF

A última análise de sensibilidade se refere à variação da TDF paga pelas Prefeituras, a Figura 18 relaciona fortemente o tempo de recuperação a esse valor. O ideal para o Governo é que não fosse cobrado valor algum por esse lixo, ao contrario de países da Europa que pagam 170 Euros por tonelada, a mentalidade do brasileiro não aceita pagar imposto algum a mais e por isso para uma planta que receberia 1.200 toneladas por dia a viabilidade se faz possível, já para 400 ton/dia não.

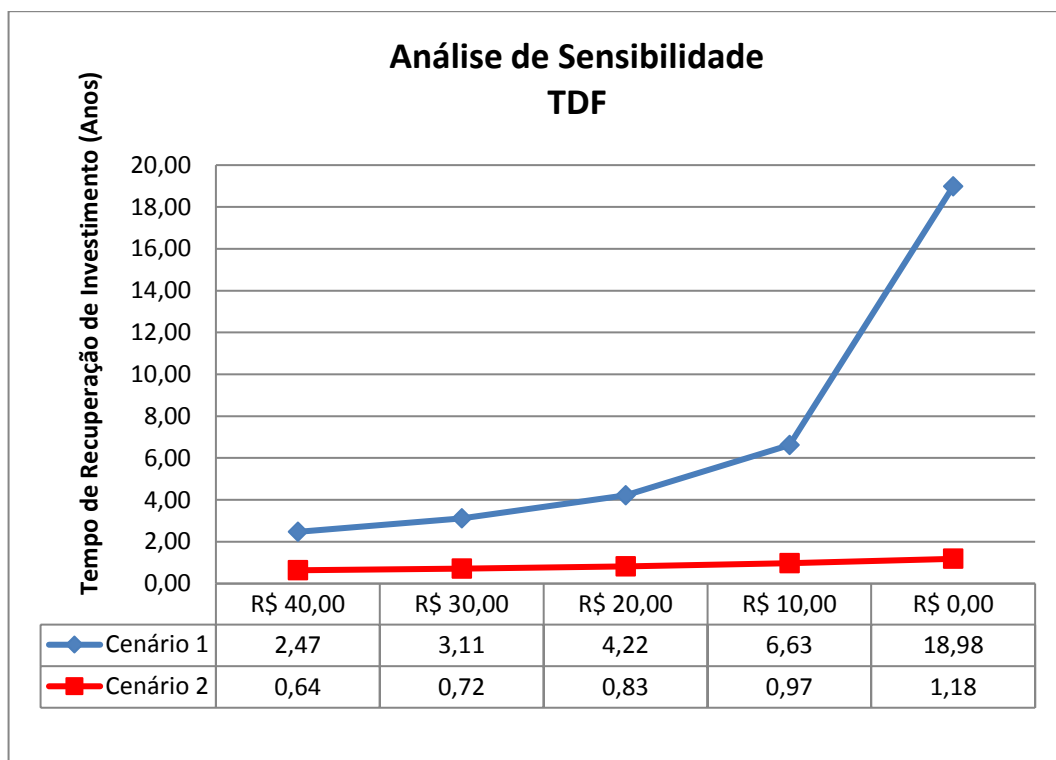


Figura 18 - Gráfico do Tempo de Retorno do Investimento em Relação a variação da Tarifa de Destinação Final

7 CONCLUSÕES

A destinação apropriada dos resíduos sólidos urbanos vem sendo um problema presente nas cidades brasileiras. As consequências da inexistente gestão eficaz de resíduos urbanos fazem com que a população e as futuras gerações sejam prejudicadas com seus efeitos diretos e indiretos nos ambientes naturais e na saúde humana. Existe, então, uma urgência em se tomar atitudes que modifiquem o modo de pensar o lixo como sendo um rejeito inerte, podre e intocável.

Para que isso se torne possível é necessário aprimorar o conhecimento sobre os efeitos das ações vinculadas ao gerenciamento do resíduo sólido nas três esferas em que ela se relaciona (social, ambiental e econômica) e sobre tecnologias que são utilizadas nos países desenvolvidos para uma destinação adequada e aproveitamento eficiente desses resíduos.

O RSU quando devidamente coletado e processado pode e deve se tornar uma fonte energética para o país, por ser uma fonte local, com baixos custos de distribuição de energia. Neste sentido, esta pesquisa procurou contribuir com a análise das possibilidades de valorização energética do resíduo sólido.

Uma das formas de conversão energética do RSU é por meio de processos de gaseificação combinados a ciclos de potência. Um arranjo consolidado de tecnologias foi proposto e estudado nessa pesquisa. O formato de linha de CDR e linha UTE foi analisado e orçamentos requeridos. Este estudo analisou a viabilidade técnica econômica desta usina WTE por meio de ferramenta de análise de custo/benefício.

Levando-se em consideração as hipóteses adotadas neste estudo, podemos concluir que há favorecimento da produção de combustíveis à geração de eletricidade a partir de RSU nos municípios e cidades brasileiros, tanto em relação a aspectos econômicos como a impactos ambientais.

A atratividade dessa forma de se gerar energia se mostrou excelente e com custo por kWh muito interessantes. Os cenários, diferenciados para a quantidade de lixo produzido, permitiram avaliar para uma gama de variações as respostas relativas e seus custos associados. E a análise de sensibilidade deve ser uma ferramenta de ajuda na tomada de decisão, pois varre muitas possibilidades diversas para cada cenário. O trabalho mostrou-se conclusivo e animador para o cenário de gestão de resíduos no Brasil

INVESTIGAÇÕES FUTURAS

Algumas sugestões de investigações futuras que devem ser realizadas:

- Avaliação do RSU gerado no DF;
- Análise técnica da implantação de um sistema para secagem do RSU anterior a gaseificação;

- Análise da viabilidade ambiental detalhada do processo escolhido;
- Utilizar maior número de fontes de dados sobre investimento e O&M para cada tecnologia;
- Elaborar outras análises com outras configurações para a planta de CDR;
- Avaliar a atratividade entre a venda de energia ou a comercialização de CDR peletizado;
- Elaborar pesquisa sobre as emissões de CDR.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. ESTIMATIVA DOS CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO DE ATERROS SANITÁRIOS NAS BACIAS DOS RIOS SÃO FRANCISCO E PARNAÍBA. 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

ABRELPE [Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais]. Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2012. São Paulo: ABRELPE, 2012. Disponível em <http://www.abrelpe.org.br/panorama_2012.php>. Acesso em: 22 mai de 2008.

ALMEIDA, G. S. (2006). Metodologia para avaliação econômica de unidades resfriadoras de líquidos por compressão e absorção. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânica, Publicação ENM.DM-107A/06, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 119p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CARVÃO MINERAL. Disponível em <http://carvaomineral.com.br/interna_conteudo.php?i_subarea=16&i_area=2>. Acesso em: 12 jun. 2015.

BOSCOV, M. E. G. Geotecnia Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

BRASIL 2011: BRASIL. Ministério do meio Ambiente. Petição. 1o set. 2004. Disponível em: <http://www.justicaambiental.org/br/campanha_form.asp?conteudo_id=2029> Acesso em: 17 mar. 2015.

BRONZATTI, F. L., NETO, A. L. MATRIZES ENERGÉTICAS NO BRASIL: CENÁRIO 2010-2030, ENEGEP 2008.

CAIXETA, D. M. Geração de energia elétrica a partir da incineração de lixo urbano: O caso de Campo Grande/MS, 86 p. 297 mm, (UnB-CDS, Especialização, Resíduos Sólidos, 2005).

CALDERONI, S. Os Bilhões Perdidos no Lixo. São Paulo: Humanitas Publicações FFLCH/ USP, 1997.

CAPUTO, A.; PELAGAGGE, P. RDF production plants: I Design and Costs. Applied Thermal Engineering, Volume 22, pp.423-437. Italia 2002.

CARVALHAES, V. (2013). Análise do Potencial Energético de Resíduo Sólido Urbano para Conversão em Processos Termoquímicos de Gaseificação. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.DM-216A/2014, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117p

CARVALHO, M. O. M. (2006). Software para análise econômica de sistemas energéticos. In: RIBEIRO, B. B. Análise Econômica de Tecnologia de Energia. Universidade de Brasília.

CASTRO, A. L., 2000, “Avaliação de Investimento de Capital em Projetos de Geração Termoelétrica no Setor Elétrico Brasileiro Usando Teoria das Opções Reais”. Dissertação M.Sc., PUC/RJ, Engenharia Industrial: Finanças e Análise de Investimentos, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento de São Paulo. Procedimentos para implantação de aterros sanitários em valas. São Paulo: CETESB, 2001.

CHANG, N. B., YH Chang, WC Chen - Evaluation of heat value and its prediction for refuse-derived fuel - Science of the total environment, 1997 – Elsevier.

CHANG, Y.H., CHEN, W.C., CHANG, N.B. Comparative evaluation of RDF and MSW incineration. Journal of Hazardous Materials, 1998. pp. 33-45.

CHERNICHARO, C. A. L.. UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais. Reatores anaeróbios. 2. ed., v. 5. Belo Horizonte, 2007.

CTENERG - Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: situação atual, oportunidades e desenvolvimento. Disponível em: <http://www.cgee.org.br/arquivos/estudo003_02.pdf> Acesso em 23 mar 2015.

DALAIA, A. K., NISHANT, B., ESWARAMOORTHIA, I., SCHOENAU, G. J. - Gasification of refuse derived fuel in a fixed bed reactor for syngas production, 2009.

DELAGADO, A. P. B. Análise da viabilidade de implantação de uma Usina de triagem e Compostagem na Ilha de São Vicente – Cabo Verde. Porto Alegre 2009.

DEFRA. Department of Environment, Food and Rural Affairs. Landfill bans and restrictions in the EU and US. Green Alliance. London, 2010. Documento código WR1202.

DEFRA. Incineration of Municipal Solid Waste February 2013. Disponível em: < [ww.defra.gov.uk](http://www.defra.gov.uk) >. Acesso em 12 mar 2015.

DIAS, S. M.; SILVA, R. B., BARREIRO, F. e COSTA, M., AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO DE CDR EM PORTUGAL CONTINENTAL: Julho de 2006 Instituto Superior Técnico CEBQ – Centro de Engenharia Biológica e Química.

DOKA, G. Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Ecoinvent report n. 13. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. St. Gallen, 2009.

DYMINSKI, A. Disposição de RSU, Paraná: Universidade Federal do Paraná, 2010.

ENVIROS. Enviros Consulting Limited. Incineration of Municipal Solid Waste. DEFRA - Department of Environment, Food and Rural Affairs. London, 2007.

EPE. Empresa de pesquisa energética. Avaliação Preliminar do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS. Série Recursos Energéticos: Nota Técnica, 2008.

EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2022 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2013.

EPRI [Electric Power Research Institute], 2011, “Waste-to-Energy Technology: Opportunities for Expanding Renewable Generation & Reducing Carbon Emissions”.

Estudo de Vida Útil Econômica e Taxa de Depreciação a ANEEL. (2000) Escola Federal de Engenharia de Itajubá. CERNE - Centro de Estudos em Recursos Naturais e Energia. Novembro 2000.

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. (2011) RELATÓRIO DE AVALIAÇÃO PRELIMINAR Aterro Sanitário “Central de Resíduos do Vale do Aço” Santana do Paraíso, Minas Gerais Brasil. Preparado com o apoio de: Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (EPA) Programa de Aproveitamento do Gás Metano de Aterros.

FELLENBERG, G. Introdução aos Problemas da Poluição Ambiental. São Paulo: Pedagógica e Universitária Ltda., 1980.

FILHO, J. M. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru Departamento de Engenharia Mecânica Manutenção e lubrificação de equipamentos. Qualidade da mão de obra na manutenção.

GENDEBIEN, A., Leavens, A., Blackmore, K., Godley, A., Godley, K., Lewin, K., Whiting, K. J. And Davis, R. - Refuse Derived Fuel, Current Practice And Perspectives, 2003.

HENRIQUES, R. M.; OLIVEIRA, L. B.; COSTA, A. O. (2002) Geração de Energia com Resíduos Sólidos Urbanos: Análise Custo Benefício. IVIG-COPPPE/UFRJ.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos. Brasília. 2012. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2015.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas / CEMPRES – Compromisso Empresarial para Reciclagem. Lixo Municipal. Manual de Gerenciamento Integrado. 2.ed. São Paulo: IPT/CEMPRES, 2000.

JANNUZZI, M. G. Cost-effectiveness of CO₂ emissions reduction through energy efficiency in Brazilian building sector, January 2015.

JURAS, I. d. A. G. M. Destino dos Resíduos Sólidos e Legislação sobre o tema. Brasília – DF, Consultora Legislativa da Área XI – Meio Ambiente, Geografia, Urbanismo, Arquitetura:6, 2000.

KAKARAS, E.; GRAMMELIS, P.; AGRANIOTIS, M.; DERICH, W.; SHIFFER, H., MAIER, J.; HILBER, T.; GLORIUS, T.; BECKER, U. (2005). Solid recovered fuels as coal substitute in the electricity generation sector. Thermal Science, Volume 9, No 2, pp. 17-30.

KOTHARI, R.; SINGH, R.P.; TYAGI, V.V.; ALLEN, T; IBRAHIM, M. R.; An overview for exploring the possibilities of energy generation from municipal solid waste (MSW) in Indian scenario. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, p. 4797 4808, 2011.

KUMAR, S. (2000). "Technology options for municipal solid waste-to-energy project."

LIMA, José Dantas de. Gestão de Resíduos Sólidos no Brasil. Disponível em Web Resol, <<http://www.resol.com.br/cartilha4>>. Acesso em: 23 mai. 2015.

LOPES, E. J. Desenvolvimento de sistema de gaseificação via análise de emissões atmosféricas. Curitiba, 2014. Disponível em: <<http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/tese/66.pdf> > Acesso em set 2015.

MAMEDE, M. C. S Avaliação Econômica e Ambiental do Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos no Brasil. – Campinas, SP : [s.n.], 2013. UNICAMP.

MCDUGALL, F. R.; WHITE, P. R.; FRANKE, M.; HINDLE, P.. Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory. 2ª ed.: Blackwell Science Ltd, 2001.

MENDES, L. G. Análise da Viabilidade Econômica de uma Usina Termelétrica Usando Modelagem Estocástica e Teoria de Opções Reais. Departamento de Engenharia Eletrotécnica da Escola Politécnica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Fevereiro, 2006. pp 71.

MONTEIRO, J. H. P., (org.). Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

MORRIS, M. W. L. (1999). Energy Recovery from solid waste fuel using advanced gasification technology. International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies, Orlando, Florida/EUA, University of California.

PAITON Jr., J. D. (1983).w Maintainability and Maintenance Management Instrument Society of America.

PINHEL, A. C. C., 2000, “Simulação de Uma Usina Térmica a Gás no Novo Contexto do Setor Elétrico – Análise Risco X Retorno”. Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Planejamento Energético, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PESQUISA NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO, Sistema IBGE de Recuperação Automática, 2002 e 2010, 2000.

POLAZ, C.N.M. & TEIXEIRA, B.A.N. (2009) Indicadores de sustentabilidade para a gestão municipal de resíduos sólidos urbanos: um estudo para São Carlos (SP). Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 14, n. 3, p. 411-420.

RIBEIRO S. G. Geração De Energia Elétrica Com Resíduos Sólidos Urbanos - Usinas “Waste-To-Energy” (WTE). Conselho de Pesquisa em Tecnologia de Geração de Energia a Partir de Resíduos – CONGENERES, 2010.

SOUSA, R.S.M; GAIA D.S; RANGEL, L.S. Geração de energia através do lixo. Bolsista de Valor: revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense, v.1, 2010.

TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H, VIGIL, S. (1993). Integrated Solid Waste Management – Engineering Principles and Management Issues. McGraw-Hill International Editions, pp. 78-79.

THEMELIS, N. J. et KAUFMAN S. M. Waste in a Land of Plenty – Solid Waste Generation and Management in the US. In: Waste Management World, Sep-Oct 2004, pp. 23-28. Tulsa, OK: Pennwell Publishing, 2003.

TUBERGEN, J., GLORIUS, T., WAEYENBERGH, E. (2005). Classification of Solid Recovered Fuels. European Recovered Fuel Organization (ERFO).