

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

**Análise da conversão energética do Resíduo
Sólido Urbano: uma abordagem técnica e
econômica**

Lucimara dos Santos Ribeiro Paiva

Itajubá, novembro de 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA

**Análise da conversão energética do Resíduo Sólido
Urbano: uma abordagem técnica e econômica**

Lucimara dos Santos Ribeiro Paiva

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciência em Engenharia de Energia.

Área de Concentração: Exploração do uso racional de Recursos naturais e Energia.

Orientador: Rubenildo Vieira Andrade

Co-Orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora

Novembro de 2015
Itajubá

Dedicatória

Dedico essa dissertação a toda minha Família.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, meu refúgio e minha fortaleza, que sempre me deu forças para continuar. A Nossa Senhora das Graças minha mãe intercessora de todos os momentos.

Aos meus pais Antonio e Ana Maria que junto de meus irmãos Benedito Cláudio, Luiz Henrique, Antonio Carlos, Steve Angstrom, Luciana, Shirley e Maria Aparecida, que sempre me incentivaram a seguir e nunca desistir, mesmo quando a caminhada ficava muito difícil.

Aos meus sobrinhos e amigos que ajudavam a caminhada ficar mais leve.

Ao meu esposo Paulo Roberto, que sempre com muito carinho me apoiou, incentivou e me ajudou muito, abdicando muitas vezes da minha presença.

Ao meu filho Matheus, luz da minha vida.

Agradeço ao imenso apoio dos meus queridos amigos, professora Regina Mambeli, Juliana Sales Moura, Marcio Leme e ao Ivan Felipe Silva dos Santos, que me deram um suporte mais que significativo na minha caminhada.

E as minhas amigas Fernanda Mendes e Cristina Sales que na caminhada final me ajudaram a restabelecer as minhas forças com o carinho da amizade e nas dificuldades do trabalho.

Ao professor pesquisador José Luiz Gonçalves que me apoiou e incentivou em muitos momentos.

Ao meu orientador Rubenildo Vieira Andrade e co-orientador Electo Eduardo Silva Lora, pela confiança, amizade, apoio e orientação.

E a todos que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho

A empresa ANP que subsidiou a execução deste trabalho

Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo o propósito debaixo do céu. Eclesiastes-3.1

Resumo

Atualmente o Brasil apresenta uma população da ordem de 205 milhões de habitantes e enfrenta muitos desafios, sendo dois deles muito importantes; A necessidade de inserir novas fontes alternativas de energia na matriz energética brasileira; E o descarte inadequado dos resíduos. Os resíduos sólidos urbanos (RSU) apresentam um potencial energético significativo, podendo gerar energia elétrica por meio de tecnologias disponíveis, como é o caso do aterro sanitário e da gaseificação. Estas tecnologias, além de contribuir com a oferta de energia, ajudam no descarte adequado desses resíduos. Considerando o fato de que no Brasil o crescimento do número de habitantes é constante, e conseqüentemente a quantidade de resíduos gerados e o consumo de energia elétrica também são, este trabalho procura analisar tecnicamente e economicamente a viabilidade de ambos os processos, a fim de suprir os desafios, tanto do descarte correto dos resíduos, quanto da geração de energia. A partir do estudo de caso adotado nesta pesquisa, o consórcio do CIMASAS, o resultado apontou inviabilidade para geração de energia para o caso de aterro sanitário

Palavras- chave:Aterro Sanitário, Gaseificação, Resíduos Sólidos Urbanos.

Abstract

Currently Brazil has a population about 205 million and faces many challenges, two of them very important; The need to insert new alternative sources of energy in the Brazilian energy matrix; Also the inappropriate disposal of waste. The municipal solid waste (MSW) have a significant energy potential and can generate electricity through available technologies, such as the landfill and gasification. These technologies, besides to contribute to energy supply, help in the proper waste disposal. Considering the fact that in Brazil the number of habitants grows constantly, and consequently the amount of waste generated and the electricity consumption are too, this paper seeks technically and economically analyze the feasibility of both processes in order to meet the challenges of both the proper disposal of waste, as the generation of energy. From the case study adopted in this research, CIMASAS consortium, the results showed infeasibility for power generation in case of landfill and viability in the case of gasification of MSW with payback twelve and a half years.

Key words: landfill, gasification, Municipal Solid Waste.

Sumário

Índice de Tabelas.....	1
Índice de Figuras	2
1-Introdução	13
2.Objetivos	15
3. Revisão bibliográfica.....	16
3.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	16
3.2 Disposição Final de Resíduos Sólidos.....	22
4 Sugestões de tecnologias para a geração de energia a partir dos RSU.....	28
4.1 Biogás.....	29
4.1.1 Produção do Biogás de Aterro	29
4.1.2 Estimativa de produção do biogás de aterro.....	39
4.2 Incineração	42
4.3 Gaseificação	45
5. Metodologia	65
5.1 Análise para o aproveitamento energético do gás de aterro sanitário (biogás)	66
5.2 Resultados da análise do aproveitamento energético do gás de aterro sanitário (biogás).....	81
5.3 Análise da tecnologia da Gaseificação dos RSU.....	92
5.4 Resultados da análise da tecnologia da Gaseificação dos RSU	98
6. Análise Econômica.....	101
6.1 Principais Indicadores Econômicos	101
6.2 Parte I- Viabilidade da utilização do Biogás do Aterro Sanitário	103
6.3 Parte II- Viabilidade da utilização da Gaseificação do RSU.....	110
7. Discussão dos resultados das duas tecnologias de aproveitamento do gás de RSU para conversão em energia elétrica	117
7.1 Comparação das duas tecnologias, vantagens e desvantagens	117
7.2 Quantidade de energia acumulada em vinte anos para as duas tecnologias.....	120

7.3 Viabilidade econômica das duas tecnologias	121
8.Conclusões	122
9.Recomendações para trabalhos futuros	124
10 Anexo A : Cálculos da potência e energia produzida e disponível no gaseificador	125
11.Referências Bibliográficas	127

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 Tabela 3.1 Distribuição de geração de RS por regiões do Brasil.....	17
Tabela 3.2 Quantidade de alguns resíduos no Brasil em 2011.....	17
Tabela 3.3 Códigos e nomes de resíduos não perigosos.....	21
Tabela 3.4 Quantidade de municípios no Brasil e forma de destinação final dos resíduos em 2011.....	22
Tabela 4.1. Valores sugeridos para k,1.....	40
Tabela 4.2: Valores sugeridos para o k,2.....	40
Tabela 4.3. Valores de Lo sugeridos para o conteúdo de parcela orgânica de RSU.....	41
Tabela 4.4: Fração de carbono orgânico degradável nos resíduos.....	42
Tabela 4.5: Eficiências para diferentes tipos de energia proveniente de RSU.....	59
Tabela 4.6: Composição dos RDF.....	61
Tabela 5.1 População total do CIMASAS em 2010.....	69
Tabela 5.2: Projeção populacional para os municípios do CIMASAS nos anos de 2010 a 2029.....	83
Tabela 5.3: Geração de RSU per capita do CIMASAS ano de 2010.....	84
Tabela 5.4: Cronograma de funcionamento dos módulos de geração no aterro de Itajubá.....	87
Tabela 5.5: Variação da potência disponível e instalada utilizando o biogás.....	88
Tabela 5.6: Características de um MCI comparadas a outras tecnologias.....	89
Tabela 5.7: Média da geração de metano e energia produzida no aterro para num período de vinte anos.....	90
Tabela 5.8: Consumo de energia em kWh dos municípios.....	90
Tabela 5.9: Tempo de abastecimento de energia em kWh de cada município.....	91
Tabela 5.10: Quantidade de resíduos analisados no processo de gaseificação.....	93
Tabela 5.11: Poder calorífico do RDF.....	95
Tabela 5.12: Especificação do grupo gerador a gás escolhido para a gaseificação de RDF.....	98
Tabela 5.13: Materiais retirados dos RDF.....	99
Tabela 5.14: Potência Disponível no gaseificador Co-corrente.....	100
Tabela 5.15: Análise da geração de energia para o processo de gaseificação.....	101
Tabela 6.1 Custos de equipamentos para aproveitamento energético dos aterros.....	104
Tabela 6.2: Custos de equipamentos para implantação do projeto.....	111
Tabela 7.1: Vantagens das duas tecnologias de aproveitamento energético.....	118
Tabela 7.2: Desvantagens das duas tecnologias de aproveitamento energético.....	119
Tabela 7.3: Potência e energia acumulada em vinte anos das duas tecnologias.....	120
Tabela 7.4: Custos comparativos entre as duas tecnologias.....	121

Índice de Figuras

Figura 3.1 Exemplo de aterro sanitário.....	24
Figura 3.2 Exemplo de aterro sanitário.....	25
Figura 3.3 disposição de resíduos em aterro sanitário com o método de valas.....	26
Figura 3.4 Método de disposição em aterros em método de rampa.....	27
Figura 3.5 de disposição de resíduos em aterros com o método de área.....	27
Figura 4.1 Esquema de coleta de gás de um aterro sanitário.....	32
Figura 4.2 Dreno de biogás em um aterro sanitário.....	33
Figura 4.3 Possíveis usos do biogás em relação ao nível de processamento requerido.....	36
Figura 4.4 Diagrama de funcionamento de uma gaseificador.....	47
Figura 4.5 Ilustração de um gaseificador de leito fixo.....	49
Figura 4.6 Esquema de um gaseificador de leito fixo contracorrente.....	50
Figura 4.7 Esquema de um gaseificador de leito fixo co-corrente.....	51
Figura 4.8 Esquema de um gaseificador de fluxo cruzado.....	52
Figura 4.9 Esquema de um gaseificador de leito fluidizado borbulhante.....	54
Figura 4.10 Esquema de um gaseificador de leito fluidizado circulante.....	55
Figura 4.11 Esquema de um gaseificador de duplo leito.....	56
Figura 4.12: Fluxograma do processo de gaseificação.....	59
Figura 4.13 Composição média dos RDF.....	60
Figura 4.14 Esquema de recebimento e triagem dos RSU.....	63
Figura 5.1: Localização da cidade de Itajubá.....	67
Figura 5.2: Visão geral do aterro sanitário de Itajubá.....	68
Figura 5.3: Talude para deposição de resíduos.....	70
Figura 5.4: Talude para deposição de resíduos com algumas disposição de drenos.....	71
Figura 5.5: Lagoa de tratamento de chorume.....	72
Figura 5.6: Dreno de biogás.....	72
Figura 5.7: Quantidade de resíduos que cada município depositou no aterro no período de 2010 a 2012.....	77
Figura 5.8: Composição gravimétrica dos resíduos de cada município pertencente ao CIMASAS.....	78
Figura 5.9: Esquema representativo de uma usina de aproveitamento energético em um aterro sanitário.....	80

Figura 5.10: Resultado da caracterização dos RSU comerciais e domiciliares do Aterro (2012).....	82
Figura 5.11: Geração de RSU por município por dia.....	83
Figura 5.12 Geração de RSU total do CIMASAS por dia.....	85
Figura 5.13: Curva de Geração de metano do CIMASAS.....	86
Figura 5.14 Curvas de potência disponível e instalada.....	87
Figura 5.15: Esquema de gaseificação de briquetes de RSU utilizando MCI.....	97
Figura 6.1: Fluxo de Caixa para o Biogás.....	105
Figura 6.2: VPL Cenário 1.....	106
Figura 6.3: Cenário 2.....	107
Figura 6.4: Variação da TIR em função das tarifas de energia.....	107
Figura 6.5: Variação do VPL em função da taxa de desconto (determinação da TIR).....	108
Figura 6.6: Determinação do custo de geração a partir de diferentes taxas de juros.....	108
Figura 6.7: Determinação do Tempo de Retorno de Capital em função da taxa de desconto de 12%.....	109
Figura 6.8: Fluxograma para o tratamento do RSU por gaseificação.....	110
Figura 6.9: Fluxo de Caixa para a gaseificação.....	113
Figura 6.10: Cenário 1.....	114
Figura 6.11: Cenário 2.....	114
Figura 6.12: VPL quanto a variação das taxa de Juros e tarifas de energia.....	115
Figura 6.13: Determinação da TIR em função do VPL.....	115
Figura 6.14: Determinação da TIR em função das taxas de descontos para a variação da tarifa de energia	116
Figura 6.15:Determinação do custo de geração em função da taxa de juros.....	116
Figura 6.16: Determinação do Tempo de Retorno de Capital	117

1-Introdução

Com mais de 205 milhões de habitantes (IBGE, 2015), dentre os desafios que devem ser enfrentados pelo Brasil, dois podem ser observados: o primeiro referente ao fornecimento de energia, com necessidade de viabilizar o uso de novas fontes alternativas de energia. O segundo é a implementação do descarte adequado de resíduos sólidos urbanos (RSU) (MAYA, LORA, 2014).

Quanto mais os países se desenvolvem, mais se torna necessário aumentar a produção de energia. Ela é indispensável à sobrevivência diária, começando pela alimentação, até na energia que traz conforto, como a energia elétrica. Esta é uma forma de energia fundamental para o desenvolvimento dos países, para a produção industrial e para a qualidade de vida das pessoas, influenciando nos aspectos econômicos e sociais da população.

Embora o Brasil seja um país rico em recursos naturais, como os grandes reservatórios de água nos rios, ele também ainda é fortemente dependente do petróleo, que é uma fonte não renovável de energia, na qual suas reservas irão se esgotar com o tempo. Além do fim das reservas causarem preocupações nos países dependentes do petróleo, a sua utilização contribui para o aumento do efeito estufa, com a queima dos combustíveis fósseis. Segundo o Balanço Nacional de Energia (BEM, 2015), realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), sobre a produção de energia primária no Brasil para o ano de 2014, o Brasil apresentou 42,6% de produção primária de energia, somente para o petróleo.

Desta forma, torna-se cada vez mais necessário o investimento no desenvolvimento de tecnologias que visem a utilizar outras fontes de energia, a fim de ampliar a capacidade de geração de energia elétrica no país e aproveitando do potencial energético dessas fontes. Assim, os RSU, pode ser uma alternativa para aumentar a oferta de energia no país, pois além de possuir um potencial energético, minimizará os impactos socio-ambiental que estes resíduos podem causar quando descartados de maneira incorreta.

O crescimento populacional associado ao avanço tecnológico tem influenciado nos hábitos de consumo da sociedade, aumentando o desperdício e gerando uma quantidade significativa de resíduos. Na maioria das vezes estes resíduos não são descartados de maneira correta, podendo ocasionar riscos para a sociedade e para o meio ambiente. Estes resíduos são, por exemplo, papéis, plásticos, entulhos, tecidos, podas de jardim, etc. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), foi totalizado 61,9 milhões de toneladas de resíduos em 2011 no Brasil, apresentando um aumento de 1,8%

referente ao ano anterior, dos quais 58% são descartados em aterros sanitários, 24% em aterros controlados e 17% em lixões.

A partir da degradação anaeróbia dos RSU em ambiente de aterro, produz-se um gás. Este gás, ou biogás, apresenta um grande potencial energético e que pode ser aproveitado por meio da conversão em outras formas de energia, como a eletricidade, combustível para fogões e automóveis e outros. Segundo o diretor executivo da Abrelpe, Carlos Silva Filho (2013) existem diversos projetos de aproveitamento energético no Brasil, tais como os dois aterros Bandeirantes e São João, no município de São Paulo, que já produzem energia elétrica.

Outra maneira de se beneficiar do potencial energético dos resíduos sólidos, é a gaseificação desses resíduos. A gaseificação trata-se de um processo termoquímico em que há conversão de um combustível sólido em um gás que pode ser utilizado para gerar energia elétrica, calor ou para produção de combustível sintético como gasolina e diesel (ANDRADE, LORA, 2013).

Desta forma, este trabalho procura realizar uma análise comparativa tecnológica e econômica entre a geração de energia elétrica a partir do biogás de aterro e da geração de energia elétrica com a gaseificação dos RSU. Para esta pesquisa, escolheu-se como estudo de caso, o aterro sanitário de Itajubá, Minas Gerais.

O aterro sanitário de Itajubá situa-se no município de Itajubá, localizado na região Sul do estado de Minas Gerais, que atende além do município de Itajubá, também os municípios de Delfim Moreira, Piranguçu, Piranguinho, São José do Alegre e Wenceslau Braz que fazem parte do CIMASAS (Consórcio intermunicipal dos municípios do alto do Sapucaí para aterro sanitário), que se trata de um Consórcio Intermunicipal dos Municípios do Alto do Sapucaí para Aterro Sanitário. Outros cinco municípios também pretendem se integrar neste consórcio, tais como, Cachoeira de Minas, Brasópolis, Marmelópolis, Maria da Fé e Santa Rita de Cassia.

Inicialmente os RSU de Itajubá eram depositados em um lixão sem nenhum controle ambiental. Depois de um tempo, os resíduos passaram a ser depositados em um aterro controlado, melhorando substancialmente a sua situação, sendo, no entanto, um local susceptível de bio - remediação. Atualmente, os resíduos de Itajubá são depositados em um aterro sanitário, com licença de operação da FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente), sendo modelo para os municípios.

2.Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo realizar uma comparação técnica e econômica, entre a produção de energia elétrica a partir do aproveitamento do gás gerado em um aterro sanitário e a partir da gaseificação do resíduo sólido urbano (RSU).

2.2 Objetivos Específicos

São objetivos secundários do presente estudo:

- Realização de um estudo do estado da arte das tecnologias de aproveitamento energético do gás de aterro sanitário e da tecnologia de gaseificação para utilização de RSU.
- Estudo de caso para o Aterro Sanitário de Itajubá- MG, a fim de estimar a sua produção de biogás, para a conversão em energia elétrica.
- Análise da utilização da gaseificação para a mesma quantidade de resíduos depositados no aterro sanitário, para a conversão em energia elétrica, com exceção dos resíduos com potencial para reciclagem.
- Análise econômica dos processos envolvidos.

3. Revisão bibliográfica

3.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

Historicamente, populações que experimentam ou que passam por cenários de alto desenvolvimento tecnológico, econômico estável e elevados índices de desenvolvimento humano (IDH) apresentam aumento das taxas de consumo, que por consequência assinalam altos índices de produção de resíduos. Segundo Jacobi e Besen (2006), esta produção crescente de resíduos deve-se a vários fatores, como o processo de industrialização, produção, consumo, ao crescimento demográfico acelerado e a crescente concentração de pessoas nas áreas urbanas.

Os RSU são todo material sólido ou semi-sólido que necessita ser removido por ter sido considerado inútil por quem o descarta (GIRS, 2001). Desta forma é possível definir o termo rejeito de acordo com a Lei Federal nº 12.305/2010 como a matéria que sobra dos resíduos sólidos, uma vez esgotados as possibilidades de tratamento e recuperação do material, por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, seu único fim seja a disposição final ambientalmente adequada. (BRASIL, 2010 *apud* BARROS, 2012).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da Norma Brasileira Registrada (NBR) 10.004 (ABNT, 2004, p.4), define os resíduos sólidos como:

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

De acordo com Zanta e Ferreira (2003), esta definição traduz a complexidade existente nos resíduos sólidos, uma vez que eles são originados de diversas atividades antrópicas presentes nos grupos sociais. Desta forma, a origem dos resíduos apresenta grande diversidade, dependendo do contexto de vida de cada região.

Para Bidone e Povinelli (1999) a geração de resíduos esta diretamente ligada às atividades básicas de manutenção a vida, em que a economia passa a ser um fator determinante. Contudo, os autores (*op.cit.*) consideram que há muitos outros fatores a serem analisados, como o hábito de consumo, a renda e padrões de vida da população, os fatores climáticos, as características de sexo e idades dos grupos populacionais e até mesmo os aspectos culturais, que estão vinculados diretamente à origem dos resíduos.

De acordo com os dados do panorama dos resíduos sólidos no Brasil, estabelecidos pela ABRELPE (2011), a participação dos resíduos varia com os hábitos de consumo de cada região do país, como apresenta a tabela 3.1 para o ano de 2011.

Tabela 3.1 Distribuição de geração de RS por regiões do Brasil

Região	Porcentagem
Norte	6,4%
Nordeste	22%
Centro-Oeste	8,1%
Sul	10,8%
Sudeste	52,7%

(Adaptada da ABRELPE, 2011).

Segundo a ABRELPE, foram totalizados 61,9 milhões de toneladas de RSU em 2011, apresentando um aumento de 1,8% referente ao ano anterior, sendo São Paulo o estado que mais produz RSU gerando aproximadamente 56 toneladas de resíduos por dia.

A tabela 3.2 apresenta a quantidade de diferentes materiais descartados ao longo do ano de 2011.

Tabela 3.2 Quantidade de alguns resíduos no Brasil em 2011

Material	Quantidade em ton/ano	Participação em %
Metais	1.610.499	2,9
Papel, Papelão e Tetrapark	7.275.012	13,1
Plástico	7.497.149	13,5
Vidro	1.332.827	2,4
Matéria Orgânica	28.544.702	51,4
Outros	9.274.251	16,7
Total	55.534.440	100,0

(Adaptada da ABRELPE, 2011).

De acordo com as tabelas 3.1 e 3.2 pode-se verificar que a região do Sul e Sudeste é a que mais produz resíduos, que pode ser justificado por ser uma região de grande poder aquisitivo e

urbanizada. Outro aspecto a ser notado é o fato da grande geração de matéria orgânica no país, justificando o crescente desperdício.

É o que não acontece nos países desenvolvidos nos quais a geração de resíduos passíveis de reciclagem é maior que nos países em desenvolvimento. Isto acontece devido a um crescente aumento no consumo de alimentos instantâneos, levando assim a uma menor quantidade de matéria orgânica no resíduo sólido doméstico e a um aumento de papéis, plásticos e outros utilizados como embalagem, sendo que o desperdício acaba sendo menor. (BIDONE E POVINELLI, 1999).

A minimização da produção de resíduos é uma tarefa que necessita de uma participação efetiva dos agentes políticos e econômicos, bem como da população em geral, de modo que todos possam sentir que, a partir deles poderão surgir mudanças favoráveis em assuntos referentes à redução dos resíduos (RUSSO, 2003).

3.1.1 Classificação dos Resíduos Sólidos Urbanos

O conhecimento das características de cada resíduo sejam elas físicas, químicas e biológicas é o princípio básico que se deve ter para proceder com a atribuição de responsabilidades, bem como na tomada de decisão dos órgãos municipais, estaduais e federais a respeito do gerenciamento dos resíduos sólidos, ou seja, coleta, transporte, tratamento e disposição final (BARROS, 2012).

A classificação dos resíduos varia de acordo com a sua fonte ou origem, quanto ao seu grau de periculosidade em relação aos riscos potenciais ao meio ambiente e aos possíveis danos a saúde pública (LOPES, 2003).

Segundo a Lei Federal nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), os resíduos sólidos podem ser classificados de acordo com a sua origem:

- Resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas. Constituindo uma grande variedade de itens, dentre os quais, sobras de alimento, garrafas de vidro ou de plástico, embalagens, papel higiênico, fraldas, etc. Podem conter ainda alguns resíduos passíveis de serem tóxicos como, pilhas, baterias, inseticidas, etc.(BARROS, 2012).
- Resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana. Exemplos são folhas, galhos de árvores,

terra, areia, podendo conter resíduos inadequados como, pneus, entulhos, etc. (BARROS, 2012).

- Resíduos de limpeza urbana: São procedentes de serviços de varrição, limpeza de vias públicas e logradouros. Exemplos, folhas, galhos de árvores, terra, areia. (BARROS, 2012).
- Resíduos sólidos urbanos: Constitui o somatório dos resíduos domiciliares e os resíduos de limpeza urbana.
- Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: são, sobretudo compostos de atividades comerciais, como lanchonete e restaurante, constituindo por resto de alimentos, materiais de escritório, papelão, embalagens em geral e etc. (BARROS, 2012).
- Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os geradores de resíduos sólidos urbanos. Estações de Tratamento de Água (ETA) produzem lodo que devem ser desidratados e tratados. (BARROS, 2012).
- Resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- Resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama) e do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS). Exemplos desses resíduos são os provenientes de hospitais, clínicas veterinárias, clínicas em geral, laboratórios de análises clínicas, ambulatórios, etc. (BARROS, 2012).
- Resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis. São exemplos desses materiais os concretos, madeira, cerâmica, argamassa, solos, etc. Há também possibilidades de resíduos tóxicos, como sobras de tintas, lâmpadas fluorescentes, amianto, etc. (BARROS, 2012).
- Resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades. Exemplos desses resíduos são as embalagens com restos de fertilizantes químicos e pesticidas. (BARROS, 2012).
- Resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira.
- Resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios. Exemplos desses resíduos são, o Bário solúvel, Sulfetos, Arsênio, Óleos e Graxas, Cianetos, Zinco, Cádmiio e Chumbo. (BARROS, 2012).

Segundo Bidone e Povinelli (1999), os resíduos também podem ser classificados de acordo com seu grau de degradabilidade, como se segue:

- Facilmente degradáveis: neste caso são os resíduos sólidos oriundos de centros urbanos de matéria orgânica;
- Moderadamente degradáveis: que são os papéis, papelão e material celulósico;
- Dificilmente degradáveis: são os pedaços de pano, retalhos, aparas e serragens de couro, borracha e madeira;
- Não degradáveis: nesta classe incluem-se os vidros, metais, plásticos, pedras, terra e outros.

De acordo com a norma ABNT (NBR, 10004, 2004a), a classificação de resíduos envolve o seu processo de origem, bem como de seus constituintes, de tal modo que os impactos ao meio ambiente e os possíveis danos à saúde se faz conhecer.

Segundo a Norma NBR 10004 (ABNT, 2004a), a periculosidade de um resíduo, baseia-se em propriedades físicas e químicas ou infecto-contagiosas, ou seja, caso o resíduo seja descartado de maneira inadequada, estes podem apresentar riscos à saúde pública, provocar mortes e doenças, bem como riscos ao meio ambiente. Desta forma, os resíduos são classificados em resíduos de classe I perigosos; classe II – Não perigosos, sendo estes subdivididos em: classe II A – Não inertes e resíduos classe II B – Inertes.

- Resíduos classe I – Perigosos

Segundo a GIRS (2011) e ABNT NBR 10004/04 (ABNT, 2004), são os resíduos que, em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, podem apresentar riscos à saúde pública através do aumento da mortalidade ou da morbidade, ou causar algum dano ao meio ambiente pela forma inadequada de disposição final destes resíduos. Conforme a Lei 12305/2010 (BRASIL, 2010), além dessas cinco características, somam-se a teratogenicidade e a mutagenicidade.

- Resíduos classe II - Não perigosos

Os códigos para alguns resíduos desta classe encontram-se no anexo H, da norma NBR10004, podendo ser verificado na tabela 3.3.

Tabela 3.3 Códigos e nomes de resíduos não perigosos

Código de Identificação	Descrição de Resíduos	Código de Identificação	Descrição de Resíduos
A001	Resíduo de restaurante (restos de alimentos)	A009	Resíduo de madeira
A004	Sucata de metais ferrosos	A010	Resíduo de materiais têxteis
A005	Sucata de metais não ferrosos (latão etc.)	A011	Resíduos de minerais não-metálicos
A006	Resíduo de papel e papelão	A016	Areia de fundição
A007	Resíduos de plástico polimerizado	A024	Bagaço de cana
A008	Resíduos de borracha	A099	Outros resíduos não perigosos

(Adaptada da NBR 10004,2004)

- Resíduos classe II A - Não inertes

São aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B- Inertes, nos termos da Norma NBR10004 (ABNT,2004). Estes resíduos de classe II A, não inertes, podem apresentar propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Incluídos nesta classe, encontram-se os papéis, papelão, matéria vegetal e outros (BIDONE e POVINELLI,1999).

- Resíduos classe II B – Inertes

São os resíduos que quando retirado uma amostra, e submetido a testes de solubilização, segundo as normas da ABNT NBR 10006 e ABNT NBR 10007, a partir de um contato dinâmico e estático com água destilada à temperatura ambiente, não apresentarem nenhuma alteração de seus constituintes solubilizados à concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G da NBR 10004 (2004).

Segundo a GIRS(2011), estes resíduos não oferecem nenhum risco à saúde pública e nem ao meio ambiente. Exemplos desta classe são as rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas, que não são facilmente decompostos. Caso a concentração seja maior que a estabelecida no anexo, os resíduos são considerados classe II- não-inertes (BIDONE e POVINELLI,1999).

3.2 Disposição Final de Resíduos Sólidos

Quando não são tratados de maneira correta, os RSU podem causar contaminação do solo, de águas, do ar, podem entupir bueiros e colaborar com as enchentes. Desta forma, uma tentativa para minimizar um pouco estes problemas, é dispor de forma adequada estes resíduos, a fim de reduzir os impactos sócio-ambientais causados por eles.

No Brasil, mesmo sendo totalmente impróprio, ainda existem maneiras de disposição de resíduos que são o lixão ou lançamento a céu aberto e o aterro controlado. No entanto, segundo a Lei Federal nº 12.305/2010 no artigo nº 54 da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), regulamentada por Decreto Presidencial, em 23 de dezembro de 2010, no dia 3 de agosto de 2014 (BRASIL, 2010), estará totalmente proibido no país a deposição de resíduos a céu aberto (lixões). Há também outra maneira de disposição, que é a mais apropriada ambientalmente, que é o aterro sanitário.

No Brasil, essas formas em que os resíduos têm sido dispostos variam de acordo com cada região do país. Desta forma, a tabela 3.4 apresenta a quantidade de municípios em toda extensão do Brasil, bem como a maneiras de como os resíduos são dispostos.

Tabela 3.4 Quantidade de municípios no Brasil e a forma de destinação final dos resíduos em 2011.

Regiões do Brasil					
Destinação Final	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
Aterro Sanitário	88	446	154	808	698
Aterro Controlado	109	502	148	640	365
Lixão	252	846	164	220	125

(Adaptada das Pesquisas ABRELPE, 2011).

De acordo com a tabela 3.4, a região do país que ainda necessita de uma mudança real nos métodos de disposição é a região nordeste, com um número grande de municípios com lançamento a céu aberto. Uma explicação para este fato pode ser a falta de infraestrutura devido à falta de recursos em regiões de baixo desenvolvimento econômico.

Em contrapartida, a região sudeste é a região com maior número de municípios com Aterros sanitários, que atualmente trata-se da maneira mais adequada de tratamento de disposição final de RSU. Este número elevado nos municípios pode ser justificado por ser uma região com grande número de habitantes e com recursos favoráveis a estes investimentos.

3.2.1 Aterro Sanitário

A disposição em aterros sanitários é a forma mais segura de disposição final de RSU, que consiste em projetos de engenharia, proporcionando segurança à população e ao meio ambiente, uma vez que os resíduos são totalmente recobertos. O objetivo desta forma é confinar os resíduos no menor espaço e volume possível. Há um planejamento da área escolhida, considerando aspectos de topografia, hidrologia e geologia. Conta com a disposição de canais para drenagem das águas pluviais, de coleta e tratamento do chorume e dos percolados (mistura de chorume e água infiltrada no solo), além de drenos de biogás, compactação dos resíduos, cobertura e sistema de impermeabilização do solo. A figura 3.1 é um exemplo da forma de disposição de resíduos, do aterro sanitário de Minas do Leão, a 80 km de Porto Alegre.

De acordo com a ABNT NBR 13896 (ABNT, 1997), recomenda-se:

- Critérios para localização:
 - O local deve ser tal que o impacto ambiental a ser causado pela instalação do aterro seja minimizado, a aceitação da instalação pela população seja maximizada, o local possa ser utilizado por um longo espaço de tempo e necessitando apenas de um mínimo de obras para início da operação. Em relação a adequabilidade de um local, diversas considerações técnicas devem ser feitas:
 - Topografia – Sendo esta uma característica determinante na escolha do método construtivo e nas obras de terraplenagem para a construção da instalação, recomendando-se locais com declividade superior a 1% e inferior a 30%.
 - Recursos hídricos - deve ser avaliada a possível influência do aterro na qualidade e no uso das águas superficiais e subterrâneas próximas. O aterro deve ser localizado a uma distância mínima de 200 m de qualquer coleção hídrica ou curso de água.



Figura 3.1 Exemplo de Aterro Sanitário (Sil Soluções Ambientais, 2008).

- Tamanho disponível e vida útil em um projeto- estes fatores encontram-se inter-relacionados e recomenda-se a construção de aterros com vida útil mínima de 10 anos.
- Distância mínima a núcleos populacionais- recomenda-se que a distância do limite da área útil ao aterro aos núcleos populacionais, seja maior que 500 metros.
- Obrigatoriamente deve ser observado: o aterro não deve ser executado em áreas sujeitas a inundações, em períodos de recorrência de 100 anos.
- Monitoramento de águas subterrâneas: recomendam-se ser constituído de no mínimo quatro poços, sendo um a montante e três a jusante no sentido do fluxo de escoamento preferencial do lençol freático. Os poços devem ter diâmetro mínimo de 101,6 mm (4 pol.) e ser revestidos e tampados na parte superior para evitar contaminação das águas subterrâneas.
- O sistema de drenagem de tratamento (lagoas, sistemas anaeróbios e aeróbios) do líquido percolado do aterro deve: ser instalado imediatamente acima da impermeabilização. Dimensionado de forma a evitar a formação de uma lâmina de líquido percolado superior a 30 cm sobre a impermeabilização. Construído com material quimicamente resistente ao resíduo e ao líquido percolado, e resistente as pressões originadas nas estruturas do aterro e dos equipamentos utilizados em sua operação. O

sistema de tratamento do líquido percolado deve ter seu efluente do sistema de tratamento percolado monitorado quatro vezes por ano, no mínimo.

Normalmente, nos aterros os resíduos são cobertos com uma camada de terra a cada conclusão de uma jornada de trabalho e o local da maioria dos aterros sanitários é construído em locais bem afastados das cidades. A figura 3.2 é um exemplo da forma de disposição de resíduos, do aterro sanitário de Minas do Leão, a 80 km de Porto Alegre.



Figura 3.2 Exemplo de Aterro Sanitário (Sil Soluções Ambientais, 2008).

O aterro sanitário pode ser definido como pequeno, médio ou grande porte, dependendo exclusivamente da quantidade de resíduos recebida por ele. Um aterro sanitário de pequeno porte recebe até 15 toneladas de resíduos por dia. O de médio porte recebe de 15 toneladas a 100 toneladas de resíduos por dia e o aterro sanitário de grande porte, recebe resíduo acima de 100 toneladas por dia (COPAM 1994). Contudo, atualmente há uma nova resolução a respeito de aterros de pequeno porte, podendo estes receber até 20 toneladas de resíduos por dia (CONAMA, 2008).

Como já foi mencionado anteriormente, a escolha do espaço a ser implantado o aterro sanitário, dependerá de fatores de topografia e geologia da região, a fim de otimizar os benefícios gerados pelo aterro, já que os terrenos podem ser ou não regulares.

Assim, se a região for plana, o aterro pode ser de superfície. Há três métodos disponíveis para esta situação. O método de trincheira ou valas, de rampa e de área. (GANDELINE, 2002). Luiz, Filho (2005) define estes métodos da seguinte maneira:

- Método da Trincheira ou vala: Consiste na abertura de valas, onde os RSU são dispostos, compactados e posteriormente cobertos com solo. A dimensão das valas pode variar, sendo trabalhada manualmente ou por equipamentos de grande porte. (Figura 3.3).

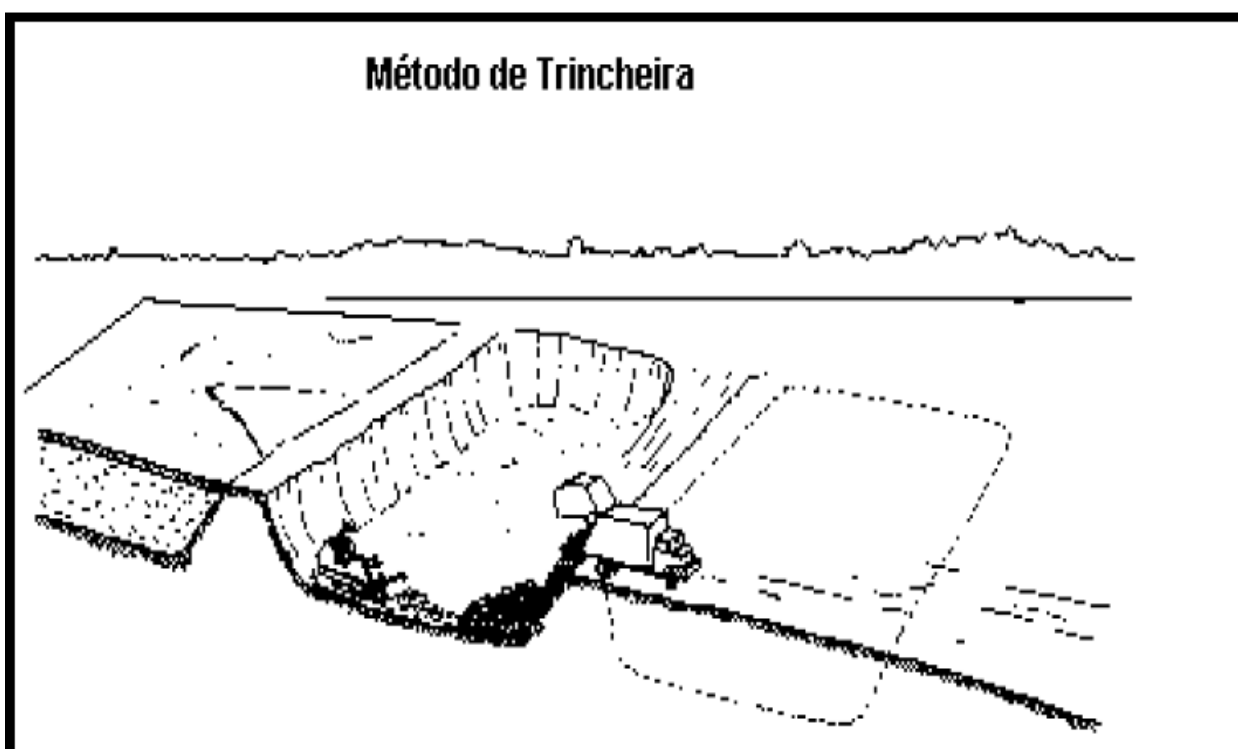


Figura 3.3 disposição de resíduos em aterro sanitário com o método de valas. (IPT, 1996 *apud* Luiz, Filho 2005).

- Método da rampa: Também conhecido como o método da escavação progressiva; neste método os RSU são dispostos e compactados pelo trator e posteriormente, coberto com solo. É geralmente empregado em áreas de meia encosta, de forma a usufruir os benefícios naturais oferecidos pelo local, como boas condições de escavação e de cobertura. (Figura 3.4).

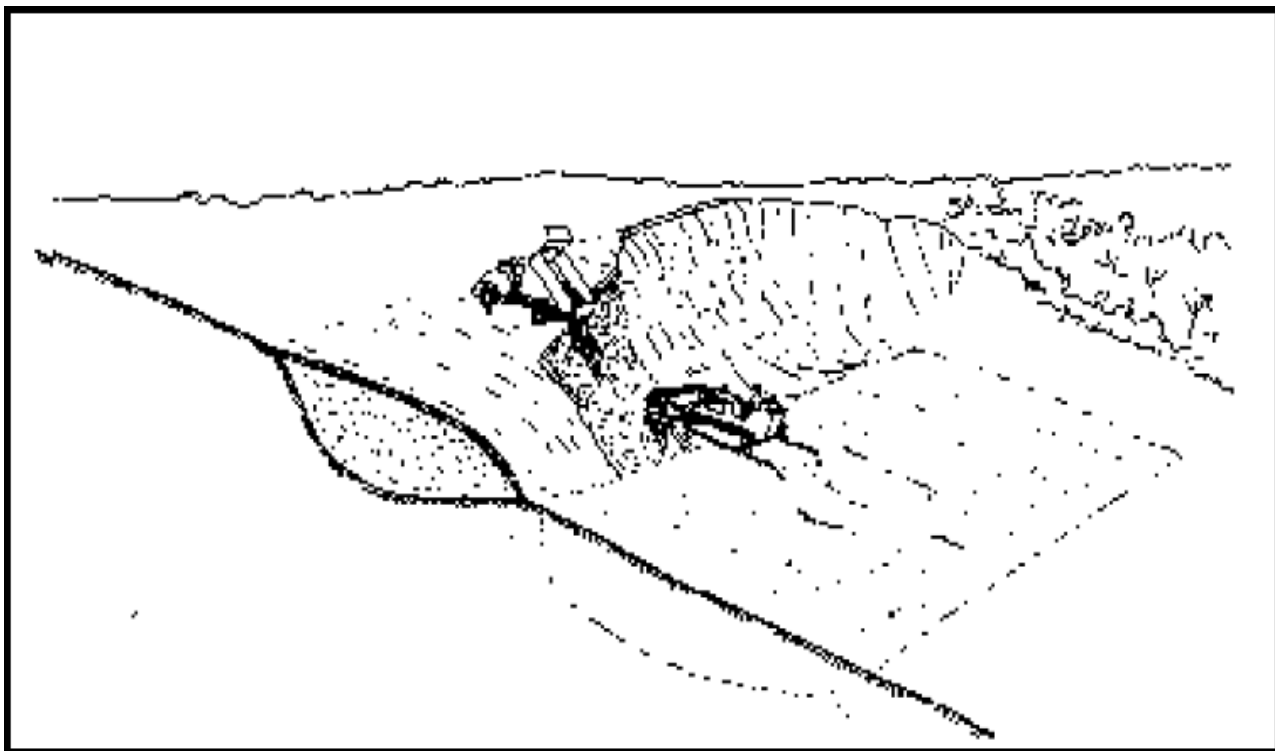


Figura 3.4 Método de disposição em aterros em método de rampa (IPT, 1996. *apud* Luiz, Filho 2005).

- Método de área: Este método é utilizado em locais cuja topografia é plana e o lençol freático é raso. Segue a ilustração na figura 3.5.

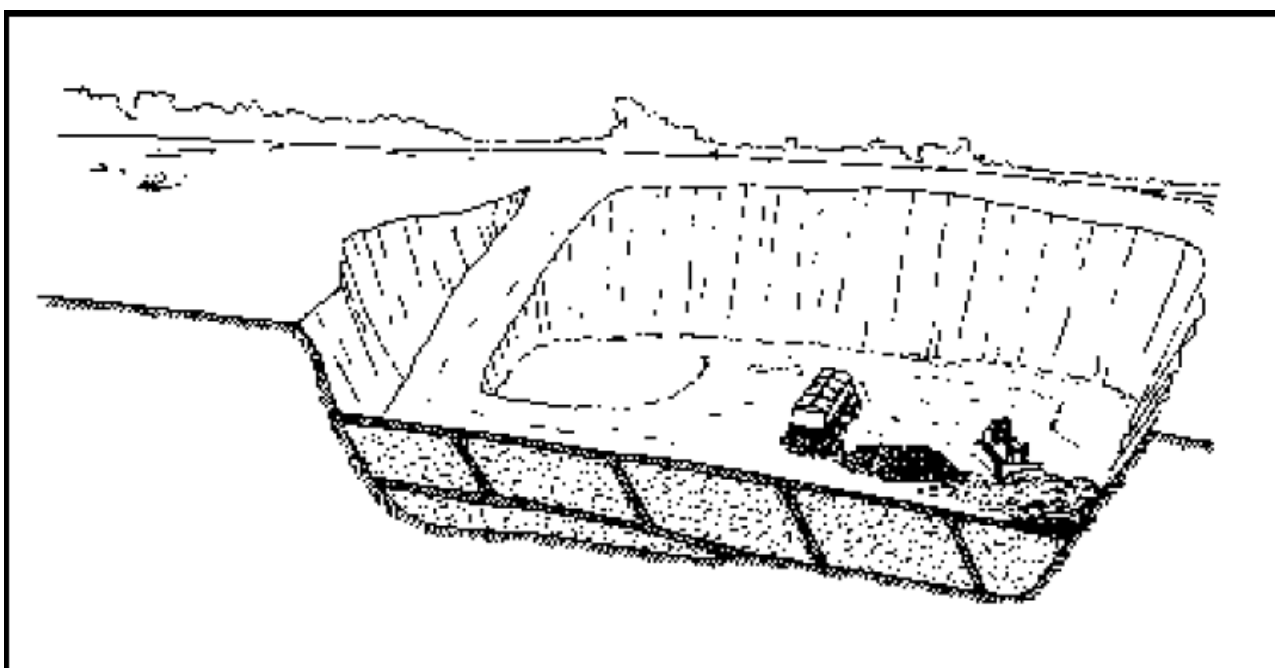


Figura 3.5 Método de disposição de resíduos em aterros em método de área. (IPT, 1996 *apud* Luiz, Filho 2005).

A escolha por um desses métodos dependerá de muitos fatores, considerações a respeito da morfologia do local, da quantidade de RSU que será destinada ao aterro, a distância ideal de afastamento do centro populacional, logo, 500 metros no mínimo de acordo com a ABNT NBR 13896 (ABNT, 1997), a preservação dos recursos hidrológicos presentes no terreno e próximo dele, ou seja, 200 metros no mínimo, segundo a ABNT NBR 13896 (ABNT, 1997).

Segundo o projeto Básico de Aterro Sanitário da Prefeitura Municipal de São Carlos (2008), é muito difícil encontrar nos municípios áreas disponíveis para a implantação de aterros sanitários com distâncias ideais, ou seja, até 15 km do centro gerador de resíduos e com vizinhança distante o suficiente, pelo menos a 1,0 km do local, e que, consiga reunir todas as condicionantes físicas e ambientais presentes.

Mesmo com todo este cuidado na escolha do lugar a ser desenvolvido o aterro, nos detalhes a planejar e executar o projeto da maneira mais eficiente, nos métodos para impactar o meio ambiente e a sociedade na menor maneira possível; ainda sim, os projetos de aterros sanitários mesmo sendo hoje uma boa opção de disposição final de resíduos, apresentam falhas e preocupações futuras.

A utilização de aterros para disposição final de resíduos apresenta preocupações como os passivos ambientais gerados durante as operações que permanecem por muitos anos após o seu encerramento, inviabilizando a utilização destas áreas por longos períodos. Outro aspecto é o fato de que, mesmo sob ótimas condições operacionais, um aterro sanitário apresenta grande potencial causador de impactos ambientais; estando sujeitos a EIA/RIMA (SANTOS, 2011).

4 Sugestões de tecnologias para a geração de energia a partir dos RSU

Os RSU são geralmente descartados pela população por não apresentarem nenhuma utilidade ou função, possuindo um potencial energético no qual pode ser recuperado em processos de conversão de energia. Esses processos, podem ser a incineração, a gaseificação ou o uso de biogás dos aterros sanitários. Neste último caso, o biogás que possui uma grande quantidade de metano, pode ser usado para gerar energia, por meio de tecnologias de Motor de Combustão Interna ou Turbinas a Gás.

4.1 Biogás

A decomposição da matéria orgânica no interior do aterro sanitário ocorre por dois processos: à decomposição aeróbia, que ocorre normalmente no período de deposição do resíduo e a decomposição anaeróbia que ocorre em seguida a esta fase com a redução do oxigênio presente nos resíduos. Este balanço químico e biológico existente em um aterro de resíduos sólidos, faz com que ele seja considerado um reator biológico, onde as principais entradas nele são os resíduos e a água e as principais saídas são os gases e o chorume (BORBA, 2006).

O biogás é produzido a partir da degradação dos RSU. Trata-se de um gás que apresenta grande potencial energético, teor combustível médio, cerca de 16,8 MJ/ m³ (Banco Mundial, 2004) e que pode ser aproveitado por meio da conversão em outras formas de energia, como a eletricidade, combustível para fogões e automóveis e outros.

Independente do aterro sanitário, o mesmo deve prever um tratamento para coleta ou queima do biogás gerado. Atualmente, já existem muitos municípios ao longo do país que desenvolvem sistema de coleta de gás para aproveitamento energético, uma vez que a quantidade obtida é significativa.

4.1.1 Produção do Biogás de Aterro

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2013), o gás de aterro é composto por vários gases, sendo alguns presentes em grandes quantidades como o metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂), que são os principais gases provenientes da decomposição anaeróbia dos compostos biodegradáveis dos resíduos. Também, há outros em quantidades bem pequenas, como a amônia (NH₃), o hidrogênio (H₂), o gás sulfídrico (H₂S), o nitrogênio (N₂) e oxigênio (O₂). Trata-se de um gás incolor, geralmente inodoro, quando não há muitas impurezas, é insolúvel, leve e de baixa densidade (EIA, 1996).

As transformações anaeróbias do material orgânico, bem como o início da formação de metano que acontece nos aterros, se dão em cinco fases (BIDONE e POVINELLI, 1999):

Fase I: ajustamento inicial

Há uma disposição dos resíduos e um acúmulo de umidade, iniciando-se o processo de estabilização detectado por mudanças nos parâmetros ambientais.

Fase II: transição

Há formação de chorume e transição da fase aeróbia para a fase anaeróbia, podendo ser verificada por meio do potencial de oxidação e redução dos resíduos. Aparecem também compostos intermediários, como os ácidos voláteis.

Fase III: formação de ácidos

Ela antecede a formação do metano e acelera as reações iniciadas na fase de transição, aumentando os ácidos orgânicos voláteis. Há o aparecimento do gás hidrogênio, que afetam a natureza e o tipo de produtos intermediários em formação. Observa-se o decréscimo do pH e liberação de nutrientes com N e P, que serão utilizados para o crescimento da biomassa.

Fase IV: fermentação metânica

Nesta fase os produtos intermediários que aparecem durante a fase de formação de ácidos são convertidos em CH_4 e CO_2 . O pH do chorume irá subir e as concentrações de DQO e DBO serão reduzidas, verificadas no lixiviado, com correspondente aumento na produção de gás.

Fase V: maturação final

Ocorre a estabilização da atividade biológica, com escassez de nutrientes e paralisação da produção de gás. Há predominância das condições ambientais naturais. Observa-se o aparecimento de O_2 e espécies oxidadas. Há uma conversão lenta dos materiais orgânicos resistentes aos microorganismos em substâncias húmicas.

A distribuição do percentual de gases pode variar conforme a idade do aterro. Outros aspectos podem influenciar na produção de biogás como a composição dos resíduos dispostos, umidade, tamanho das partículas, temperatura, pH, idade dos resíduos, projeto do aterro e sua operação (Ministério do Meio Ambiente, 2013).

Alguns desses fatores que podem influenciar na produção do biogás são citados por Borba (2006), Bidone e Povinelli (1999) e Cassine (2003):

- **Composição do Resíduo:**

A composição dos resíduos que chegam ao aterro pode afetar a produção de gases de forma quali-quantitativa, ou seja, quanto maior o percentual de materiais biodegradáveis, maior será a quantidade de substrato para os microorganismos responsáveis pela biodegradação do resíduo, aumentando a taxa de geração de gases.

- **Umidade:**

A umidade é de extrema importância na decomposição da matéria orgânica, consequentemente na produção de biogás. No entanto, muitos são os fatores contribuintes para se obter esta umidade, como, a umidade inicial de chegada dos resíduos aos aterros, a impermeabilização de fundo, a pluviosidade da região, o tipo de cobertura e a prática ou não de

recirculação de lixiviado. Nas condições brasileiras, o teor de umidade dos RSU está na faixa de 40% a 60%.

- **Tamanho das Partículas:**

A velocidade de degradação dos resíduos é maior quando o tamanho dos mesmos é menor. Desta forma, tem-se utilizado a presença de trituradores a fim de acelerar o processo de degradação.

- **Temperatura:**

A temperatura é um fator de grande importância, principalmente no interior da massa de resíduos, uma vez que existe atividade de bactérias promovendo a degradação e são sensíveis a mudança de temperatura. A formação de metano ocorre na faixa extensa de temperatura entre 0 e 97 °C, sendo a faixa ótima de 50 a 60 °C (termofílica) para a atividade metanogênica bacteriana.

- **pH:**

Normalmente, encontra-se nos aterros um pH ácido no início, que aumenta e se aproxima da neutralidade a partir do começo da fase metanogênica. De acordo com experiências brasileiras, a produção de CH₄ é máxima quando o pH situa-se na faixa de 7,0 a 7,2, para valores abaixo de 6,0 ou acima de 7,6 a atividade microbiana no aterro sanitário pode ser inibida.

- **Idade da massa de RSU:**

A geração de metano é diretamente influenciada em relação ao tempo de deposição dos RSU no aterro. Os resíduos novos possuem maior potencial de geração de metano do que resíduos antigos. Este processo de geração de gás em aterros é realizado em cinco etapas. A geração de metano começa na terceira etapa e intensifica-se na quarta que é a etapa metanogênica. A duração de cada uma dessas etapas varia de acordo com as condições de cada aterro.

- **Projeto do Aterro:**

Os projetos de aterros atualmente, cuja norma vigente é a ABNT NBR 13896 (ABNT, 1997), tem-se desenvolvido apresenta duas prioridades, que é o controle do chorume e a otimização da geração de metano. Para isto, o aterro deve ser executado em áreas onde haja predominância no subsolo de material com coeficiente de permeabilidade (R) inferior a 5.10^{-5} cm/s, de acordo com a norma da ABNT NBR 13896 (ABNT, 1997), para impedir que o chorume se infiltre no solo, contamine o lençol freático, e a migração/acumulação do biogás através de fendas do terreno.

Esta drenagem do chorume é de extrema importância, pois caso haja um aumento significativo de umidade no resíduo, pode comprometer a degradação da matéria orgânica e consequente geração de biogás. Assim, a cobertura adequada busca minimizar a entrada de águas pluviais, entrada de oxigênio e fuga do biogás para atmosfera.

▪ Operação:

A compactação dos resíduos tem sua vantagem na redução do volume de resíduos e na aceleração da geração do metano; uma vez diminuído o volume, a presença do oxigênio também diminui, afetando o processo aeróbio. Porém, essa compactação dificulta a passagem de líquidos e gases, que fazem o papel de recuperação de umidade nos períodos de seca, a fim de favorecer no processo de degradação.

Nos aterros sanitários sempre há a disposição de drenos de biogás, seja ele com a finalidade de canalizar o gás para aproveitamento energético, ou simplesmente para saída e posteriormente a queima, para que evite a sua emissão à atmosfera. Este fator dependerá do projeto inicial do aterro, se ele prevê o aproveitamento energético ou não dos resíduos e da quantidade de resíduos destinados a esse local. A figura 4.1 mostra o esquema de um aterro sanitário com aproveitamento energético do biogás e seus respectivos pontos de transporte e coleta do mesmo.

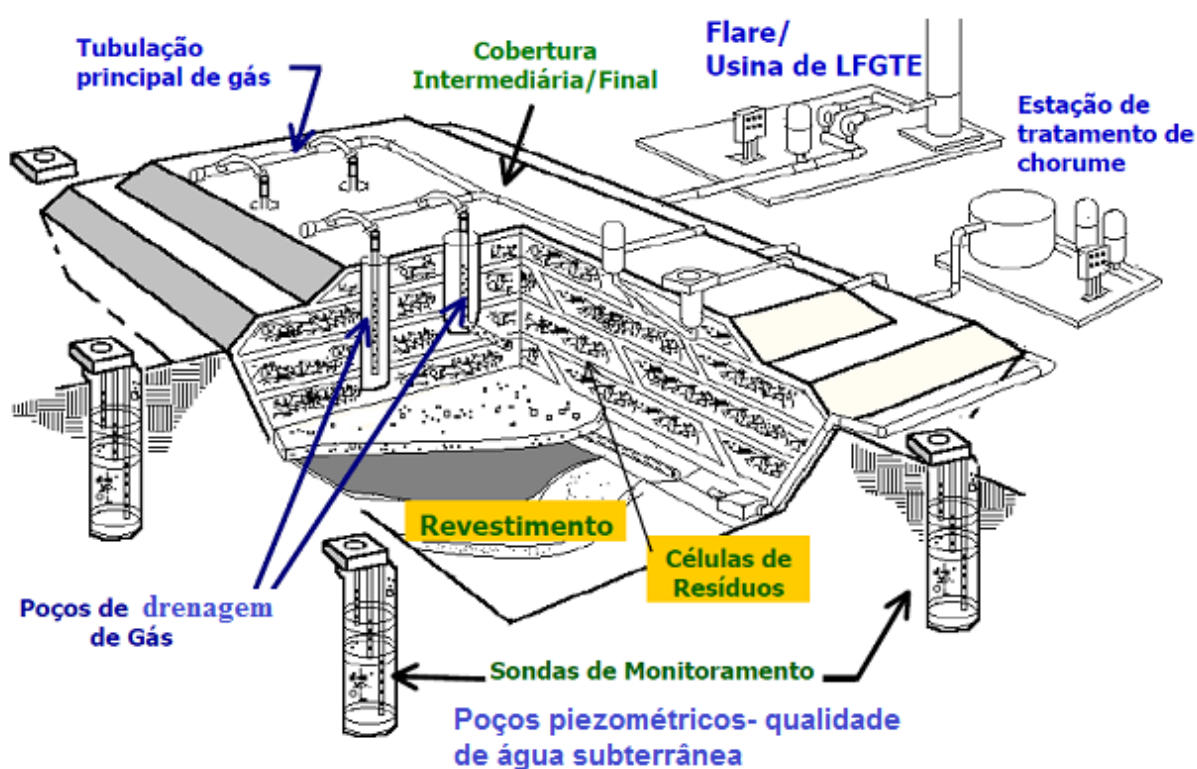


Figura 4.1 Esquema de coleta de gás de um aterro sanitário (USEPA, 2009. *apud* Leme 2010).

Geralmente os drenos sanitários, são constituídos com a superposição vertical de tubos de concreto perfurados, atravessando verticalmente a massa de resíduos aterrados, da base até a superfície superior constituindo uma chaminé. São preenchidos e envoltos de brita número quatro, por sua vez envoltos em fardo de tela, com diâmetro de aproximadamente de um metro. Um critério a ser considerado na construção desse dreno, é a vazão do gás a ser drenada, como

não há um modelo comprovado eficiente, prevalece o bom senso do projetista. Na prática esses drenos variam de 0,20 m a 1,0 m em função da altura do aterro. (BIDONE e POVINELLI, 1999; LUIZ, FILHO, 2005).

A quantidade de poços para a captura do biogás em aterros sanitários possui uma quantidade limitada. Nos EUA, por exemplo, há um poço de captura de gás de aterro para cada 4000 m² de área de aterro, o que significa que apenas uma parte do gás produzido em todo o aterro é realmente capturado (THEMELIS e ULLOA, 2007). Um exemplo de dreno de biogás envolto de brita é apresentado na figura 4.2. Este dreno pertence ao aterro sanitário da cidade de Minas do Leão, a 80 km de porto Alegre.



Figura 4.2 Dreno de biogás em um aterro sanitário (Sil Soluções Ambientais, 2008).

Aterros sanitários, cujos sistemas de recuperação do biogás sejam bem projetados, construídos e operados, podem alcançar uma eficiência de coleta de 75% ou mais do biogás produzido em um aterro (MDL 2007; BANCO MUNDIAL, 2010; EPA, 2011). Segundo o IPCC, esta eficiência pode ser até maior que 90%, considerando também aspectos de coberturas de resíduos mais espessas e menos permeáveis, diminuindo o fluxo de gases para a atmosfera (IPCC, 2006).

Segundo Babilotte *et al.* (2010), mesmo que o aterro sanitário apresente um sistema de captação eficiente de biogás, uma parte dele sempre escapará para a atmosfera, atravessando a camada de solo que envolve os resíduos, emitindo ao meio ambiente quantidades significativas de metano. Nestes casos, os aterros sanitários são responsáveis por até 20% das emissões de metano geradas por atividades antrópicas (TEIXEIRA *et al.*, 2009).

O método de cobrir os resíduos diariamente no aterro é uma maneira de se evitar a propagação de vetores de doenças, como ratos, baratas, etc, e também que o metano escape para a atmosfera. Normalmente, há a cobertura com uma camada de solo compactada. No entanto, com o passar do tempo e em contato com o meio ambiente, essa proteção pode ser reduzida. As taxas de emissões de metano em aterro sanitário variam de 0,004 a 14.794 g/m², por dia, sendo que esses valores variam de acordo com a idade do resíduo, aspectos relacionados a camada de cobertura, como espessura, grau de compactação, dentre outros. (MARIANO, 2008).

Em suas análises em campo e em laboratório a respeito dos Aterros Sanitários de Bandeirantes e Caieiras, SILVA *et.al.*, (2013), apresentaram resultados em relação às emissões fugitivas desses aterros. A emissão média total no Aterro Bandeirantes foi de 0,00126 m³. CH₄/m².h e no Aterro Caieiras de 0,01222 m³CH₄/m².h A fuga total de biogás no Aterro Bandeirantes foi de 16% e no Caieiras, 35% em relação ao total de biogás previsto para ser gerado no aterro. Isso demonstra que há uma perda significativa de biogás pela superfície dos dois aterros, comprometendo assim, a eficiência do sistema de captação para aproveitamento do biogás.

A quantidade de gás gerado em um aterro poderá sofrer diversas variações ao longo do tempo. Normalmente, o aterro passa por um recalque, de acordo com a quantidade de RSU recebida. Como já foi supracitado, diversos fatores podem influenciar na produção de biogás, assim, o volume gerado também não será constante, havendo períodos de maiores e menores produções.

Para Pecora *et al* (2008), a taxa de formação de biogás varia com o tempo em condições normais, pois a taxa de decomposição atinge um pico entre o primeiro e segundo ano, diminuindo continuamente por alguns anos. Segundo os pesquisadores (*op.cit.*) é de extrema importância que o biogás seja coletado de alguma forma das células de aterro, pois em caso contrário, o biogás pode ocasionar explosões, caso se acumule em estruturas subterrâneas, emanar pela superfície e até migrar para áreas próximas do aterro causando danos a saúde pública e ao meio ambiente.

Devido a este motivo, o aproveitamento do biogás para geração de energia é realizado com a aplicação de módulos geradores instalados e desinstalados de acordo com a taxa de geração de gases do aterro. No entanto, pode ocorrer muita geração de biogás, que poderá ser solucionado com a instalação de um flare¹, onde o gás continuará sendo queimado (LEME, 2010).

O biogás pode ser classificado segundo três categorias, baseando-se em níveis de pré-tratamento, processamento e utilização, de acordo com o Banco Mundial (2004):

- **Combustível de baixo teor:** para ser utilizado precisa de um processamento mínimo, no qual envolve câmara de remoção de condensado, como parte do sistema de coleta de biogás e locais de decantação da umidade, a fim de reduzir a umidade na vazão do biogás.
- **Combustível de teor médio:** são utilizados aparelhos adicionais de tratamento de gás para extrair uma quantidade maior de umidade, com possibilidade de conter contaminantes e matéria particulada mais fina. Este processo envolve a compressão e a refrigeração do biogás, e/ou tratamento químico ou purificação para remover umidade adicional e os compostos gasosos mercaptanas, compostos de enxofre, silício e compostos orgânicos voláteis.
- **Combustível de alto teor:** envolve extenso pré-tratamento do gás para separar o dióxido de carbono e outros importantes gases constituintes do metano e remover impurezas (como mercaptanas, compostos de enxofre, sulfureto de hidrogênio e compostos orgânicos voláteis) e compressão para desidratar o gás.

O combustível de baixo e médio teor produzido a partir do biogás tem um valor energético de aproximadamente $16,8 \text{ MJ/m}^3$, podendo ser utilizado para alimentar estufas, caldeiras, e o combustível de alto teor possui um valor de cerca de $37,3 \text{ MJ/m}^3$, podendo ser utilizado como substituto direto do gás natural, uma vez que sua composição é de 98% de metano (BANCO MUNDIAL *apud* BARROS, 2013).

Essa classificação é feita de acordo com o tratamento realizado com o gás; logo, quanto maior for o tratamento, melhor o gás irá se tornar no que se refere ao seu potencial energético e conseqüentemente, poderá ser convertido em diversas formas de energia de maneira mais eficientes.

¹-Flares ou queimadores são instrumentos utilizados para queimar o biogás de maneira segura com temperaturas elevadas, evitando danos ao meio ambiente pela liberação de metano na atmosfera (LEME, 2010).

4.1.2 Potencial energético do biogás e alternativas de aproveitamento

As vantagens que se tem obtido do aproveitamento do gás de aterro tem se mostrado em diversos lugares no Brasil. O que antes teria sido somente um projeto piloto, hoje se tornou realidade para muitas regiões, cuja iluminação é feita a partir da energia produzida pela conversão do biogás.

A figura 4.3 apresenta as diversas formas de aproveitamento do biogás de acordo com seu o tratamento. A partir dela, é possível verificar que as maneiras de se utilizar o biogás produzido em aterros como forma de energia são muitas, como a energia térmica a partir de tecnologias de ciclo a vapor e tratamento de chorume, uso veicular e iluminação a gás. Nestes casos, é preciso realizar um tratamento do gás e a geração de energia elétrica a partir de tecnologias de conversão energética com motores de combustão interna -ciclo otto e microturbinas, que são as mais utilizadas atualmente.

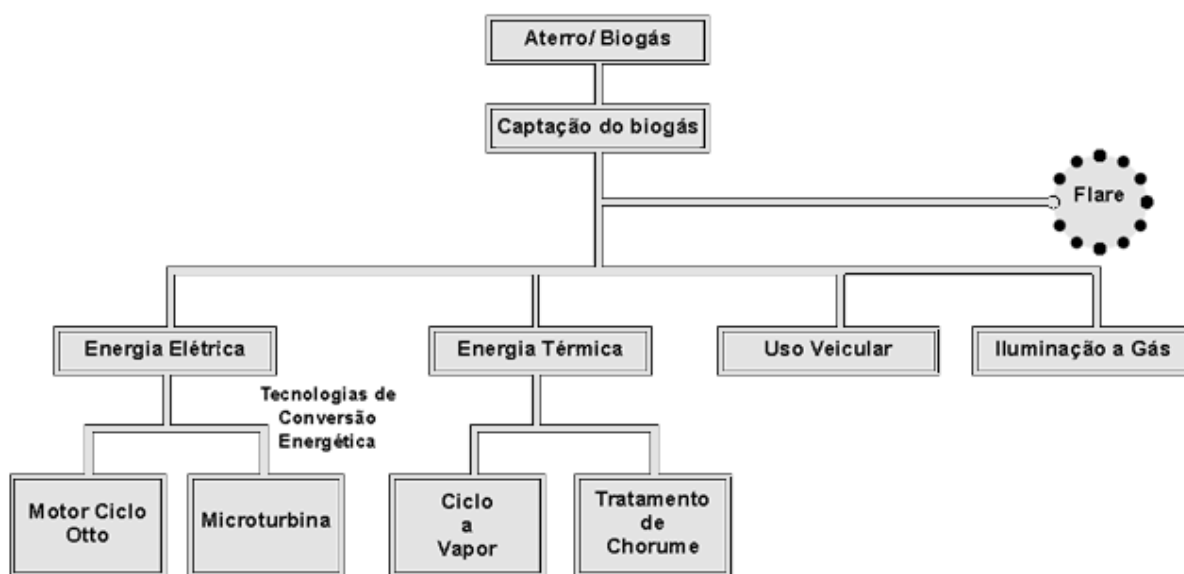


Figura 4.3 Possíveis usos do biogás em relação ao nível de processamento requerido (Adaptado de Instituto Agir Sustentável *apud* ICLEI, 2009).

Segundo Salomom e Lora (2005), as vantagens da produção de energia elétrica a partir do biogás são evidentes. Para os pesquisadores (*op.cit.*), os resíduos são fontes renováveis que geram energia descentralizada e próxima dos pontos de carga, possibilitam uma receita extra quando negociada a energia gerada com concessionárias, possibilidade de processos de co-geração, além da redução de metano na atmosfera, uma vez que é considerado um gás de efeito estufa.

Nessa perspectiva, Landim e Azevedo (2008) desenvolveram cálculos a partir de dados da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental CETESB (1999), chegando à conclusão de que, se a geração de metano em depósitos de RSU no Brasil é de 945 milhões de m³ por ano e a porcentagem de metano é de 55% do volume de biogás, tem-se então uma energia disponível de 2,1 TWh, o suficiente para atender uma cidade de 875 mil residências, com consumo médio mensal de 200 kWh, equivalente a uma cidade de 3,5 milhões de habitantes aproximadamente.

4.1.2.1 Geração de Energia Elétrica- Motores de Combustão Interna - Ciclo Otto

Este motor quando comparado a outras tecnologias é o mais utilizado para a queima do biogás, uma vez que este apresenta um maior rendimento elétrico e com menor custo. Para promover a queima do biogás em motores de combustão interna são necessárias pequenas modificações nos sistemas de alimentação, ignição e taxa de compressão (ICLEI, 2009). Esses motores tem o objetivo de obter trabalho a partir da liberação da energia química dos combustíveis.

O princípio de funcionamento deste motor segue as etapas seguintes (FERNANDES, 2006):

1. Admissão (Primeiro Tempo): É a etapa na qual a mistura combustível é aspirada para o interior do cilindro, mantendo a válvula de aspiração aberta.
2. Compressão (Segundo Tempo): Nesta fase, as duas válvulas estão fechadas e há um aumento da temperatura da mistura combustível durante a compressão.
3. Combustão (Terceiro Tempo): Nesta fase é que ocorre a explosão da mistura no fim da fase de compressão, que logo segue com expansão dos gases, impulsionando o pistão para baixo.
4. Exaustão (Quarto Tempo): Esta é a fase da descarga, onde o pistão expulsa de dentro do cilindro os gases resultantes da queima através da válvula de escape.

Toda vez que termina o quarto tempo, o motor volta ao começo, repetindo o ciclo novamente. Exemplos de aplicabilidade desta tecnologia são as duas grandes centrais térmicas situadas em São Paulo, o aterro sanitário de bandeirantes e o de aterro sanitário de São João, que geram energia elétrica a partir de biogás, utilizando motores ciclo Otto. O aterro sanitário municipal bandeirantes, possui 24 grupos geradores (motores ciclo Otto acoplados a geradores) que possuem capacidade de geração de 22 MW (925 kW cada um) e capacidade instalada de 20

MW de potência. Esse empreendimento é considerado o maior projeto mundial de geração de energia elétrica exclusivamente a biogás. (ICLEI, 2009).

A ordem de grandeza dos investimentos para aterros sanitários variam de acordo com o tamanho do aterro: para aterro de pequeno porte (ou seja, aqueles que recebem até 20 toneladas de resíduos por dia, CONAMA, 2008) nos quais há baixa produção de biogás e logo, baixa obtenção de metano, existem motores de potências variadas que vão desde 5 kW até 230 kW, cujo investimento é da ordem de R\$ 20.000,00 até R\$700.000,00 cada unidade. Para os aterros sanitários de grande porte, com interesse de se aproveitar todo o biogás produzido, existem motores importados de potências variadas que vão desde 925 kW até 1,54 MW, cujo investimento de cada unidade é da ordem de R\$ 3.400.000,00 até R\$ 5.000.000,00 (ICLEI, 2009).

4.1.2.2 Geração de Energia Elétrica- turbinas a gás

Os elementos constitutivos principais da turbina a gás são compressor, câmara de combustão e turbina. O desempenho das turbinas a gás é afetado, principalmente, por dois fatores: perdas em geral, como atrito ou escoamento e limitações impostas pelos materiais das turbinas. Quanto maior a temperatura à saída da câmara de combustão, maior a eficiência da turbina a gás. (SARAVANAMUTTOO *et al.*, 1972).

As turbinas a gás são usadas em grandes aterros, com projetos de 3 a 4 MW no mínimo. A economia na geração de energia e a eficiência do sistema aumentam de acordo com a escala do projeto, podendo ser uma alternativa mais adequada para grandes plantas de geração (SILVA, 2012; LEME, 2010).

Os custos de instalação, operação e manutenção e também a eficiência elétrica do sistema aumentam de acordo com a escala do projeto, sendo assim, a turbina a gás é uma alternativa mais adequada para grandes plantas de geração (LEME, 2010).

Existem disponíveis atualmente no mercado microturbinas que variam de 30 a 1.000 kW, dependendo somente do potencial de geração de energia elétrica disponível no aterro sanitário. O investimento das microturbinas podem variar de R\$ 195.000,00 para 30 kW, a R\$ 3.200.000,00 para 1.000 kW (1 MW), (ICLEI, 2009).

4.1.2 Estimativa de produção do biogás de aterro

Para se estimar a produção de metano em um aterro sanitário, vários métodos podem ser utilizados. Estes modelos são semelhantes para desenvolver uma curva de geração de biogás, prevendo teoricamente sua produção ao longo do tempo (BANCO MUNDIAL, 2004). Ferramentas como software, permitem a melhores avaliações de gerenciamento de resíduos sólidos, como WARM, landGEM, Banco Mundial e IPCC.

➤ WARM

Trata-se de um modelo de redução de resíduos (WAsT Reduction Model, WARM), foi criado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América para estimar as reduções de Gases de Efeito Estufa (GEE), a partir de práticas de gestão de diferentes resíduos sólidos. O modelo WARM está disponível como planilha do Microsoft Excel e baseado na Web (BARROS, 2012).

➤ landGEM

O modelo Landfill Gas Model (LandGEM), é uma ferramenta automatizada de estimativa de geração de biogás em aterros sanitários, utilizando a planilha do Microsoft Excel. Pode ser utilizada para estimar as taxas de emissão de gás total do aterro, metano, dióxido de carbono, compostos orgânicos e poluentes atmosféricos (BARROS, 2012).

➤ Modelo do IPCC

O modelo Scholl Canyon faz uma previsão da produção de biogás de aterro durante um tempo determinado, como uma função da taxa de geração de metano, da capacidade potencial de geração de metano e dos registros históricos de deposição de RSU e das projeções futuras dos RSU (BARROS, 2012).

É um modelo matemático, sendo o mais utilizado e recomendado. Desenvolvido pelo IPCC (1996), e atualizado em 2006, sendo o mais aceito por agências de financiamento e instituições que apoiam este tipo de projeto (BANCO MUNDIAL, 2004). Esta metodologia foi atualizada a fim de considerar valores multifásicos para o k , antes não utilizados, sendo estes valores aplicados em função das características de degradação de cada tipo de resíduo.

A constante (k) representa a taxa de decomposição biológica, a qual indica a velocidade em que o biogás é gerado após a disposição dos resíduos. Esta constante é influenciada pelo teor de umidade dos resíduos, a disponibilidade de nutrientes, pH e temperatura da região. O teor de umidade dentro de um aterro é um dos parâmetros mais

importantes, podendo afetar a taxa de geração de gás. Ele é influenciado principalmente, pela infiltração da precipitação através da cobertura do aterro. Os valores típicos variam de 0,01 a 0,09 como podem ser observados na tabela 4.1 (BANCO MUNDIAL, 2004).

Tabela 4.1. Valores sugeridos para k,1.

Precipitação anual	Valores para k (ano ⁻¹)		
	Relativamente inerte	Decomposição moderada	Decomposição alta
< 250 mm	0,01	0,02	0,03
> 250 a < 500 mm	0,01	0,03	0,05
>500 a < 1000 mm	0,02	0,05	0,08
>1000 mm	0,02	0,06	0,09

Fonte: Adaptado do Banco Mundial (2004).

As taxas mais rápidas, ou seja, k=0,2 estão relacionadas a condições de elevada umidade e materiais que são degradáveis rapidamente, como os restos de alimentos. Já as taxas de decomposição mais lentas, ou k=0,03 são os resíduos secos e a de lenta degradação, como a madeira ou o papel (BORBA, 2006). De acordo com IPCC, os valores de k são variáveis, como é apresentado na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Valores sugeridos para o k,2.

Tipo de Resíduos		Clima							
		Boreal e temperado seco		Boreal e temperado molhado		Tropical seco		Tropical úmido e molhado	
		(MAP/PET < 1)		(MAP/PET >1)		(MAP < 1000 mm)		(MAP ≥ 1000 mm)	
		Padrão	Variação	Padrão	Variação	Padrão	Variação	Padrão	Variação
Degradação lenta de resíduos	Papel/Têxteis	0,04	0,03-0,05	0,06	0,05-0,07	0,045	0,04-0,06	0,07	0,06-0,085
	Madeira/Palha	0,02	0,01-0,03	0,03	0,02-0,04	0,025	0,02-0,04	0,035	0,03-0,05
Degradação moderada de resíduos	Outros Orgânicos putrescíveis (exceto alimentos)/Lixo de jardins e parques	0,05	0,04-0,06	0,1	0,06-0,1	0,065	0,05-0,08	0,17	0,15-0,2
Degradação rápida de resíduos	Resíduos alimentares/Lama de esgoto	0,06	0,05-0,08	0,185	0,1-0,2	0,085	0,07-0,1	0,4	0,17-0,7
Massa de resíduos total		0,05	0,04-0,06	0,09	0,08-0,1	0,065	0,05-0,08	0,17	0,15-0,2
Onde: MAT: Temperatura média anual, MAP: Precipitação média anual, PET: Potencial de Evapotranspiração									

Fonte: Adaptado IPCC (2006)

O potencial de geração de metano (L_0) representa a produção total de metano em m^3 de CH_4 por tonelada de resíduo. Este valor é particularmente relacionado com composição dos RSU em relação a fração de matéria orgânica presente na massa de RSU. Ele é estimado com base no teor de carbono dos resíduos, na fração de carbono biodegradável e no fator de conversão estequiométrica. Os valores típicos para este parâmetro variam de $125 m^3$ a $310 m^3$ de CH_4/t de resíduo (BANCO MUNDIAL, 2004). A tabela 4.3 apresenta os valores sugeridos para o conteúdo resíduo orgânico.

Tabela 4.3 Valores de L_0 sugeridos para o conteúdo de parcela orgânica de RSU.

Categorização do Resíduo	Valor Mínimo de L_0 ($m^3 CH_4/t$. de resíduo)	Valor Máximo de L_0 ($m^3 CH_4/t$. de resíduo)
RSU Relativamente Inerte	5	25
RSU Moderadamente Degradável	140	200
RSU Altamente Degradável	225	300

Fonte: Banco Mundial (2004).

A metodologia utilizada no modelo é determinada pelas seguintes equações e parâmetros (IPCC, 2006):

$$\bullet \quad CH_{4total} = \sum_j CH_{4j} \quad \text{Eq.4.1}$$

$$\bullet \quad k_j = \ln 2 / t_{1/2j} \quad \text{Eq.4.2}$$

$$\bullet \quad CH_{4j} = L_{0j} \cdot W \cdot R_j \cdot e^{-k_j(y-x)} \cdot (1 - e^{-k_j}) \quad \text{Eq.4.3}$$

$$\bullet \quad L_{0j} = MCF \cdot DOC_j \cdot DOC_f \cdot F \cdot (16/12)/ d \quad \text{Eq.4.4}$$

Onde os parâmetros utilizados no modelo são:

- DOC_j = Fração de carbono degradável no resíduo (tC / t RSU)
- DOC_f = Fração dissolvida de carbono degradável no resíduo (%)
- F = Fração de metano no biogás (% em volume)
- MCF = Fator de correção do metano (adimensional)
- T = Temperatura na zona anaeróbia °C
- $t_{1/2}$ = Tempo médio para 50% da decomposição (anos), meia vida
- d = Massa específica do metano ($7,17 \cdot 10^{-4} t/m^3$)
- CH_{4j} = Emissões de metano com o resíduo tipo j (t)

- $\text{CH}_{4\text{total}}$ = Emissão de metano total (t)
- Lo_j = Potencial de geração de metano do resíduo j ($\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{t RSU}$)
- K_j = Taxa de degradação do resíduo j (ano^{-1}).

O parâmetro **DOC**, fração de carbono degradável no resíduo, ($\text{tC} / \text{t RSU}$), tem uma porcentagem referente a cada tipo de resíduo, de acordo com o IPCC (2006), como é apresentado na tabela 4.4.

Tabela 4.4 Fração de carbono orgânico degradável nos resíduos

Resíduo tipo j	DOC _j (tC/tRSU)
Madeira e derivados de madeira	43%
Polpa, papel e papelão (não em forma de lodo)	40%
Alimentos, resíduos de alimentos, bebidas e tabaco (não em forma de lodo)	15%
Texteis	24%
Resíduos de jardins	20%
Vidro, plástico, metal e outros resíduos inertes	0%

Fonte: (IPCC, 2006)

4.2 Incineração

A incineração trata-se de um processo com combustão, que tem como princípio básico a reação do oxigênio com componentes combustíveis presentes no resíduo como carbono, em temperatura superior a 800 °C, convertendo sua energia química em calor (FEAM, 2012).

Este processo diminui o volume dos RS por meio da combustão, eliminando os agentes patogênicos presentes nos resíduos, o qual ainda permite a recuperação de energia desde que os resíduos não sejam excessivamente úmidos. Com essa tecnologia, os resíduos passam por um tratamento térmico em uma temperatura média de 950 °C, no qual os gases quentes a cerca de 1.000 °C são direcionados para uma caldeira, onde são utilizados para geração de vapores que por sua vez, acionam um grupo gerador capaz de gerar eletricidade (SILVA, 2012).

Ou ainda pode ser definida como, a tecnologia que envolve a destruição dos resíduos pela queima controlada a partir de altas temperaturas, gerando calor, o qual pode ser convertido em

energia. A incineração é bem utilizada em grandes cidades, uma vez que reduz a quantidade de resíduos a ser enviada aos aterros e pode estar localizada em zonas urbanizadas (UNEP, 2005).

A incineração é um dos processos mais antigos para tratamento térmico dos resíduos e tem sido utilizada desde o início do século XX. Desde as décadas 1990 ela tem sido empregada com tecnologias modernas. Atualmente, quase todos os incineradores estão sendo projetados com aproveitamento energético (GONÇALVES, 2007).

No Brasil, nas décadas de 80 e 90, o conceito dos processos de tratamento térmico recebeu muitas críticas devido às altas emissões de poluentes, principalmente de dioxinas, por esta razão foram aplicados ao setor limites de emissões rigorosos (LEME, 2010). Entretanto em países desenvolvidos como Alemanha, Japão, Suíça, EEUU e outros, este conceito foi visto de uma maneira diferente, dando espaço a muitas plantas que foram construídas recentemente, e outras estão em construção, principalmente para a geração de energia.

Nos últimos anos, a maioria das instalações de tratamento de gases, das principais plantas dos países citados, foram substituídas e atendem hoje em tempo integral, todas as normas de proteção ambiental, sendo que a operação delas tem sido muitas vezes, acompanhada de perto pela comunidade local (MENEZES et al , 2000).

O primeiro incinerador municipal no Brasil foi instalado em 1896, em Manaus-AM, para processar 60 t por dia de resíduos domésticos, tendo sido desativado somente em 1958 por problemas de manutenção. Um equipamento similar foi instalado em Belém-PA e desativado em 1978 pelos mesmos motivos (MENEZES et al.,2000).

Em 1913, instalou-se no município de São Paulo um incinerador especial, com capacidade para 40 toneladas por dia de resíduos, com um sistema de recuperação de energia, formado por uma caldeira e um alternador. Entretanto, por apresentar alguns problemas de adaptação à rede elétrica, teve que ser desativado, sendo então, substituído por motores elétricos convencionais que foram desativados em 1949 e demolidos em 1953. Além deste, também foram instalados mais outros três incineradores em São Paulo: Pinheiros, em 1944; Região de Vergueiro, em 1959, e Bom Retiro, em 1967 (op.cit.).

Em 1950, no Rio de Janeiro, com o surgimento da construção de prédios de vários andares, instalaram-se diversos incineradores prediais, com o intuito de queimar os resíduos gerados nos apartamentos. No entanto, em 1969 e 1970 foram extinguidos por não possuírem nenhum controle do processo de incineração (GONÇALVES, 2007).

A incineração no Brasil ainda é caracterizada pela existência de grandes quantidades de incineradores de pequeno porte, instalados principalmente em hospitais, os quais operam de forma precária, sem manutenção adequada e sem controle de emissões atmosféricas (op.cit.).

Enquanto a tendência mundial é de aproveitar os RSU para a geração de energia, no Brasil, mesmo que já existam alguns projetos referente a este aspecto, nenhum é efetivamente representativo. Em vários países já se encontram termelétricas movidas a carvão e RS utilizados na geração de energia elétrica. Contudo no Brasil, as termelétricas movidas a biogás, também, já deveriam estar sendo implantadas, uma vez que poderiam contribuir na solução de dois grandes problemas: de energia e do tratamento ambientalmente correto dos RS, atendendo as exigências do meio ambiente (MENEZES et al., 2000).

No entanto, esta importância tende a crescer no Brasil, como vem ocorrendo nos países desenvolvidos, justificada pelas dificuldades de construção de novos aterros, como seu constante monitoramento ambiental, mesmo após estes serem desativados. Outro fator são os custos de aterramento, que incluem o transporte até o local de destino (*op.cit*).

Muitos benefícios podem ser alcançados a partir dessa tecnologia como uma drástica redução do volume de RS e a descontaminação dos mesmos. Desta forma, pode-se ter uma conservação da vida útil dos aterros sanitários.

As usinas de incineração utilizam fornalhas para queima de resíduos e vaporização da água para ser aproveitado em outros processos. O porte das usinas de incineração podem variar conforme a quantidade de RSU a ser processada, operando na faixa de 50 a 100 toneladas por dia, podendo chegar até a 1.000 toneladas de resíduo processado por dia. As usinas de escala reduzida são úteis em comunidades com população em torno de 30 a 200 mil habitantes, produzindo entre 50 e 200 t/dia de RSU. Já, as usinas de grande escala apresentam vantagem da economia de escala na utilização dos resíduos e também na geração de energia, à medida que as turbinas a vapor utilizadas podem ser maiores e com isso, de maior eficiência (BURANI et al., 2006).

Segundo Menezes et al. (2000), a tecnologia atualmente disponível de projeto de incineradores pode prever a geração de até 0,95 kWh/t processada, sendo que a grande maioria dos sistemas instalados gera de 0,4 a 0,95 kWh/t de capacidade. Entretanto, esta geração dependerá fortemente do poder calorífico do RSU processado.

De acordo com os autores (*op.cit*), com a experiência atual em relação a recuperação de energia a partir da incineração, que a geração de energia elétrica se torna rentável somente em instalações com capacidades de processamento acima de 250 toneladas por dia. Abaixo desta capacidade, a energia é normalmente aproveitada apenas para uso da própria planta. No Brasil, até o momento, conforme já exposto anteriormente, as aplicações da incineração se restringem ao processamento de resíduos perigosos e de alto risco, industriais, hospitalares e aeroportuários, e pouco tem sido efetivamente realizado no que se refere à reciclagem da energia contida.

4.3 Gaseificação

A gaseificação da biomassa tem se tornado uma atraente alternativa para enfrentar os desafios futuros, como um possível racionamento de energia, uma vez que o rápido esgotamento das reservas de combustível fóssil tem levado ao desenvolvimento de tecnologias de baixo custo, permitindo assim, investigações na recuperação de energia de RSU (MALIK *et al*, 2008; BELGIORNO *et al*, 2003).

Trata-se de uma tecnologia recente em processos de conversão de energia de resíduos, sendo utilizada para melhorar a eficiência e para reduzir os custos de investimentos da biomassa na geração de eletricidade, utilizando a tecnologia de turbina a gás. Relatos de estudos econômicos mostram que as plantas de gaseificação de biomassa podem ser tanto comercialmente exploradas, quanto o carvão é utilizado convencionalmente em usinas (BADIN e KIRSCHNER, 1998 *apud* MALIK *et al*, 2008). No entanto, a razão mais importante para a popularidade crescente de processos térmicos para o tratamento de resíduos sólidos como a gaseificação, tem sido a crescente insatisfação técnica, ambiental e pública com o desempenho dos processos convencionais de incineração (ZAFSA, 2001).

O processo de gaseificação representa avanços significativos em relação à incineração. Em vez de produzir apenas calor e eletricidade, como é feito em uma fábrica de transformação de resíduos em energia usando incineração, o gás de síntese produzido por gaseificação pode ser transformado em produtos de maior valor comercial, como um combustível sintético. Em média, as usinas convencionais que usam a massa de resíduos para gerar energia com a incineração, podem converter uma tonelada de RSU para cerca de 550 quilowatts-hora de eletricidade. Com a tecnologia de gaseificação, uma tonelada de RSU pode ser usado para produzir até 1.000 quilowatts-hora de eletricidade, uma forma muito mais eficiente e mais limpa para utilizar esta fonte de energia (gasification.org, 2014).

Muitas são as vantagens da gaseificação de RSU quando comparada com tecnologia da incineração; principalmente quando os efeitos são de mitigar os impactos ambientais. De acordo com Schilli (2004), MITSUI & CO., LTD, (2013), Lopez Juarez (2010) *apud* Maya e Lora (2014):

- Melhorias em relação a redução da acidificação do ar, uma vez que a quantidade de óxidos de enxofre que são emitidos pela gaseificação (SO_2) <1,05 ppm, é bem menor que o emitido pela incineração (SO_2): 26-29 ppm;

- Em relação aos GEE, os autores (*op. cit.*) relataram maiores reduções, quando comparado com a tecnologia de incineração, a gaseificação evita mais de 400% das emissões de CO₂;
- Uma vez que o processo de gaseificação ocorre com quantidades mínimas de oxigênio, a formação de dioxinas é menor do que a combustão;
- O principal produto formado pela gaseificação é o gás de síntese (monóxido de carbono e hidrogênio), e da incineração são as cinzas e alguns gases como dióxido de enxofre, dióxido de carbono, além de outros gases .
- Das dioxinas e furanos, a gaseificação, tendo como princípio uma temperatura de funcionamento (> 1000 ° C) e pouco oxigênio pode destruir qualquer dioxinas / furanos que possa estar presente na matéria-prima, bem como eliminar o potencial de criação destes. Já a incineração apresenta potencial de formação de dioxinas e furanos, através da presença de oxigênio e cloro.

A gaseificação é de um processo termoquímico em que há conversão de um combustível sólido em um gás que pode ser utilizado para gerar energia elétrica, calor ou para produção de combustível sintético como gasolina e diesel (ANDRADE, LORA, 2013)

Uma definição para a gaseificação pode ser apresentada como o processo no qual a matéria orgânica, os resíduos são transformados em gás combustível por meio da queima, com pouco ar disponível em relação à queima estequiométrica. Neste processo, o agente oxidante pode ser o ar, oxigênio ou vapor. O gás produzido é um gás pobre, ou seja, de baixo poder calorífico variando de 4 a 18 MJ/Nm³, dependendo do agente oxidante e a sua utilização é variada, como para o acionamento de motores de combustão interna, turbinas a gás, queimadores etc. Este gás tem na sua composição o CO, CO₂, CH₄, N₂ e particulados entre outros. (ANDRADE, 2007; CARRARA, 2010).

O processo de gaseificação acontece por meio de equipamentos denominados gaseificadores, também denominados de reatores químicos, resultando em diferentes etapas. Dentro dos gaseificadores a biomassa passa por quatro zonas diferentes, tais como secagem, redução, oxidação e pirólise.

- Secagem da biomassa: É a zona que apresenta um controle de temperatura, a fim de garantir a secagem da biomassa. A umidade da biomassa pode variar até 90% requerendo do reator uma quantidade significativa de energia, 2260 kJ (MARTINS, 2006 *apud* CARNEIRO, 2009; ANDRADE 2007; LUZ, 2013).

- Pirólise: É a zona do reator onde ocorre a degradação térmica da biomassa ou volatilização, onde a presença do oxigênio é quase zero, tendo a formação de alcatrões² voláteis e sólidos. Há formação de H_2 , H_2O e hidrocarbonetos, sendo estes influenciados diretamente pelo tamanho das partículas, temperatura do processo, pressão e tempo de residência (MELO 2008; CORTEZ e LORA, 1997; LUZ, 2013).
- A combustão ocorre no interior do reator e tem como principal característica a produção de dióxido de carbono (CO_2) e vapor, a partir do carbono da biomassa que reage com oxigênio presente no ar. Nesta fase há uma reação exotérmica, liberando uma grande quantidade de calor, em que temperatura varia entre 700 a 2000°C (MELO 2008; CORTEZ e LORA, 1997).

A figura 4.4 ilustra um diagrama dos processos de gaseificação considerando as suas etapas.

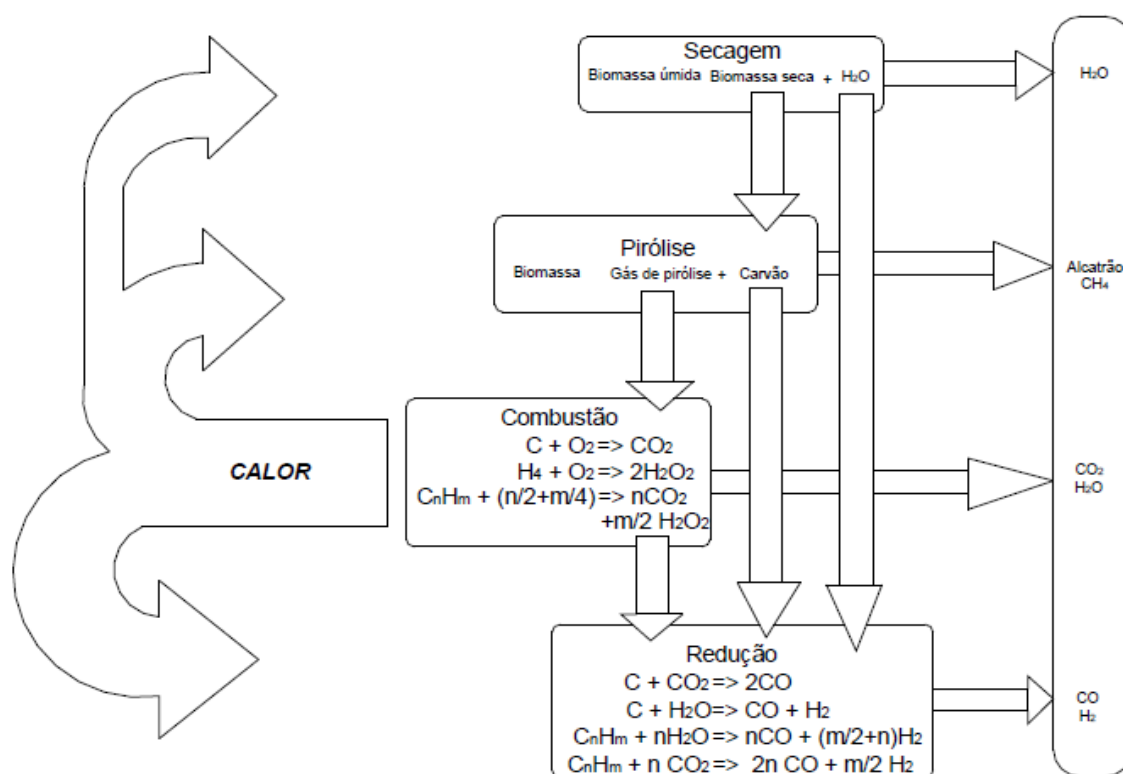


Figura 4.4 Diagrama de funcionamento de um gaseificador

(<http://btgworld.com/2005/html/technologies/gasification.html>) apud ANDRADE, 2007)

2- O alcatrão pode ser definido como um conjunto de compostos de elevado peso molecular, maior que o benzeno, presentes no gás da gaseificação, e quando condensado tem a aparência de piche. (ANDRADE e LORA, 2013).

Na última zona, redução, acontece o contrário da fase de combustão, ocorrendo reação endotérmica a uma temperatura compreendida entre 800 a 1100°C. Nesta fase o carvão é convertido principalmente em CO e H₂ (MELO, 2008; CORTEZ e LORA, 1997; LUZ,2013).

No gaseificador, parte do combustível entra em combustão e o controle no fornecimento de ar é a principal característica de um gaseificador, a fim de não entrar em combustão toda a biomassa presente no equipamento. Para Andrade (2007), a gaseificação da biomassa proporciona muitos benefícios quando comparado à queima direta, pois apresenta uma menor emissão de poluentes quando se queima o gás, é mais facilmente distribuído e a sua queima é mais fácil de ser controlada.

No entanto, os gaseificadores também apresentam aspectos negativos. A sua tecnologia é mais complicada que a queima direta, deve-se ter muita atenção em aspectos de segurança; principalmente, para possíveis casos de vazamento, pois o gás produzido é tóxico. As instalações desses gaseificadores deve necessariamente, serem muito ventiladas. Por fim, há que se considerar, a possibilidade da redução da eficiência desse sistema, uma vez que ocorrem perdas de calor e consumo de energia nos ventiladores (CORTEZ e LORA, 1997).

Os gaseificadores podem variar de acordo com o poder calorífico do gás produzido, pelo agente gaseificador, pelo movimento relativo entre a biomassa e o agente gaseificador, pela pressão de trabalho e tipos de biomassa (CORTEZ e LORA, 1997).

4.3.1 Leito fixo

Uma característica marcante em gaseificadores de leito fixo é o fato do movimento do combustível ocorrer somente por ação da gravidade. Esses gaseificadores representam a maior parte dos equipamentos destinados para este fim em todo o mundo, em que 77,5% dos projetos são de gaseificadores são de leito fixo, 20% de leito fluidizado e o restante (2,5%) de outros tipos. O ideal para gaseificadores de leito fixo são os projetos de pequeno porte, por serem adequados para conversão da pequena quantidade de biomassa. Dentre esses gaseificadores de leito fixo, ressalta-se a existência de dois grandes grupos: os de circulação de gases co-corrente (*downdraft*) e contracorrente (*updraft*). (SANTOS 2006, KRAUSE, 1990 *apud* HENRIQUES, 2009; MELO 2008; BELGIORNO *et al* , 2003).A figura 4.5 apresenta a ilustração de um gaseificador de leito fixo.



Figura 4.5 Ilustração de um gaseificador de Leito Fixo (Andrade, 2013).

Este tipo de gaseificador é o mais antigo e mais difundido em todo o mundo. Ele utiliza de uma tecnologia simples comparada a outros gaseificadores como o de leito fluidizado, em que cada um possui características específicas de acordo com o seu funcionamento, como é apresentado a seguir (CORTEZ e LORA, 1997; ANDRADE, 2007, ANDRADE e LORA, 2013):

4.3.1.1 Gaseificador Contracorrente

Este tipo de gaseificador é o mais simples, sendo que a entrada de ar fica na parte de baixo do gaseificador, com o fluxo ascendente de gases, contrário ao de alimentação de biomassa. Possuem alta eficiência térmica, uma vez que os gases quentes da zona de combustão pré-aquecem a carga de combustível ao passar por ela. Contudo, o gás originado é um gás extremamente impuro, com alto teor de alcatrão, uma vez que estes e outros produtos da pirólise não são craqueados na zona de combustão, sendo arrastados pelo gás produzido.

O projeto da grelha é um elemento muito importante, pois suporta diretamente a zona de combustão, logo, ele deve suportar altas temperaturas. A figura 4.6 apresenta um esquema de uma gaseificador de leito fixo contracorrente.

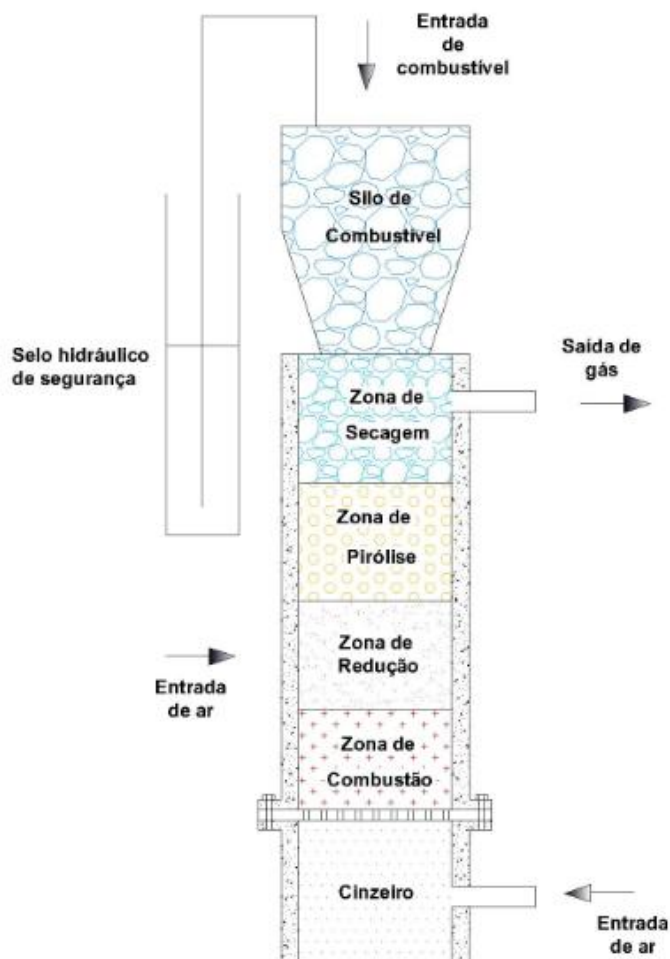


Figura 4.6 Esquema de um gaseificador de Leito fixo Contracorrente (ANDRADE,2013.).

4.3.1.2 Gaseificador Co-corrente

São os gaseificadores mais difundidos, e já eram utilizados em muitos veículos durante a segunda guerra mundial. Neste gaseificador, o gás é liberado diretamente da zona de redução, contendo consideráveis quantidades de cinzas e fuligem. No entanto, produz um gás relativamente livre de alcatrão, devido ao seu arranjo e funcionamento e por permitirem o craqueamento eficiente deste. A temperatura de saída do gás também é de cerca de 700 °C, uma vez que não há troca de calor entre as zonas de pirólise e secagem.

Nesse tipo de gaseificador, a biomassa é alimentada pelo topo do reator e o ar é fornecido no mesmo sentido do combustível e também pelas laterais. A principal característica desses

gaseificadores são a redução do diâmetro interno na região da zona de combustão e o fato dos alcatrões e voláteis originados na zona de pirólise serem direcionados a passarem por esta zona de combustão e serem sob certas condições de operação, craqueados. A figura 4.7 apresenta um esquema desse tipo de gaseificador.

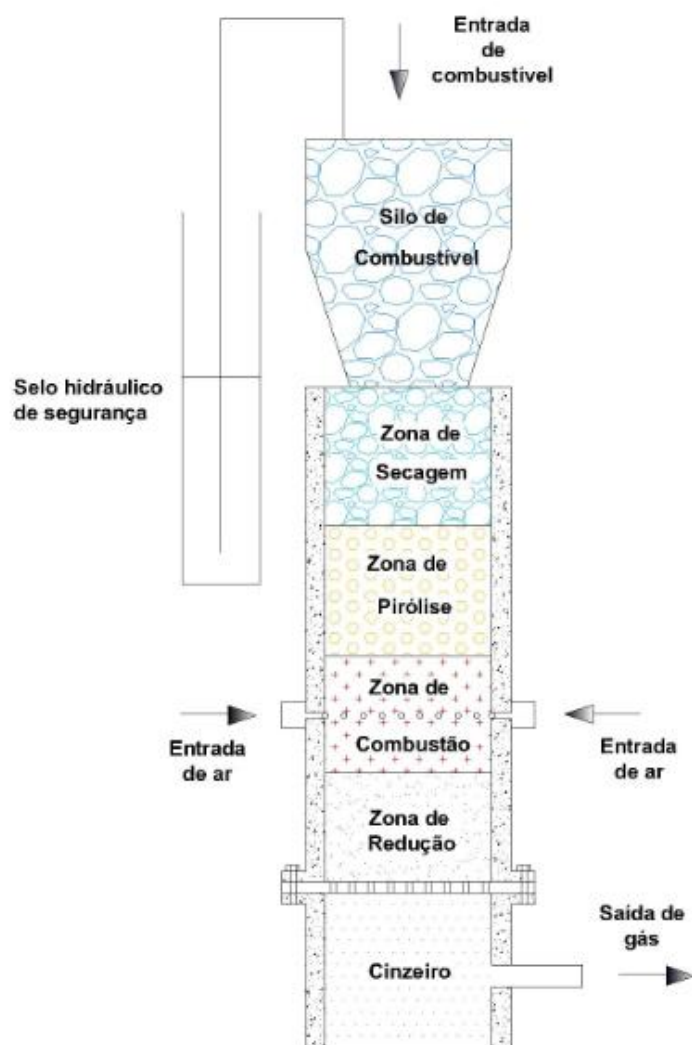


Figura 4.7 Esquema de um gaseificador de Leito fixo Co-corrente (ANDRADE, 2013).

4.3.1.3 Gaseificador de Fluxo Cruzado

Esse gaseificador possui entrada de ar e saída do gás em sua lateral e ambos posicionados na mesma altura. O gás combustível possui características intermediárias entre os gaseificadores concorrente e contraconcorrente.

A taxa de fornecimento de ar é significativamente maior que o de outros tipos de gaseificadores, criando-se desta forma, uma zona de combustão com temperaturas bem elevadas e liberação muito rápida de gases. O gás liberado neste reator possui alto teor de alcatrão e baixo poder calorífico.

Apresentam rápida resposta a variação de carga, são simples em sua construção com peso reduzido. No entanto, são sensíveis a variações em sua composição e umidade. São muito requisitados em casos práticos com carvão vegetal limpo e seco. A figura 4.8 apresenta um esquema deste tipo de gaseificador.

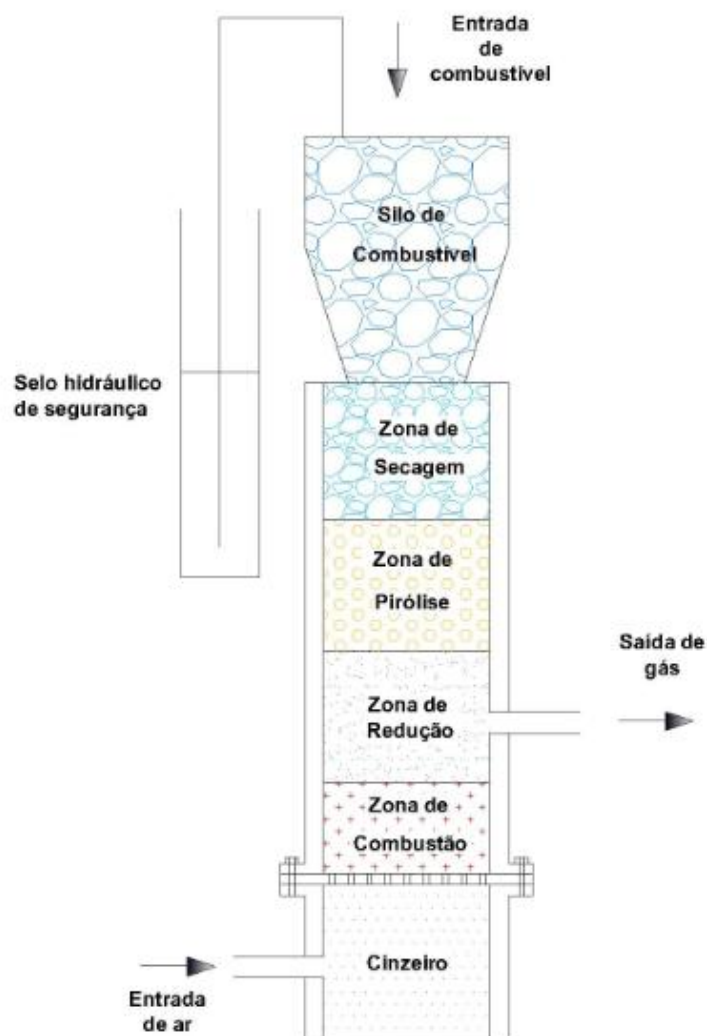


Figura 4.8 Esquema de um gaseificador de Fluxo Cruzado (ANDRADE, 2013).

4.3.2 Leito Fluidizado

Os gaseificadores de leito fluidizado apresentam uma maior complexidade que os gaseificadores de leito fixo, devido aos números de parâmetros a serem controlados ser maior. O tempo de partida de um gaseificador de leito fixo é menor quando comparado ao de leito fluidizado, sendo o de leito fixo em média 30 a 40 minutos e o leito fluidizado podendo chegar

até a duas horas. O gás fornecido pelos gaseificadores de leito fixo apresentam um alto teor de alcatrão, com valores acima de 3000 mg/Nm^3 (ANDRADE e LORA, 2013).

Particularmente, a grande flexibilidade operacional de reatores presente nesta tecnologia, faz com que seja possível utilizar diversos agentes de fluidização, temperaturas e tempos de residência no reator de gás e de operar com ou sem um catalisador específico (ARENA et al. 2010.).

Nesses gaseificadores, as partículas do combustível são mantidas suspensas em um leito de partículas que pode ser areia ou alumina, fluidizadas pelo fluxo de ar, permitindo que haja melhores condições de transferência de calor na câmara de combustão. A condição de fluidização proporciona um ótimo contato entre as partículas e o gás, promovendo a circulação das partículas. O leito é aquecido inicialmente por um combustível auxiliar (GLP, carvão vegetal, etc.) até que a temperatura seja suficiente alta. Quando essa condição for satisfeita, tem-se a entrada do combustível, iniciando o processo de gaseificação (CORTEZ e LORA, 1997).

Ainda segundo os autores (op.cit.), a principal vantagem deste tipo de gaseificador é o fácil controle da temperatura, uma vez que haja variação de alimentação de ar ou de combustível. Outra característica de gaseificadores de leito fluidizado é o fato de esses gaseificadores operarem com temperaturas mais baixas que os gaseificadores de leito fixo, reduzindo assim, os teores de enxofre, de particulados e formação de óxidos de nitrogênio (IPT, 1992 *apud* CORTEZ e LORA, 1997).

Os gaseificadores de leito fluidizado podem ser do tipo borbulhante e circulante .

4.3.2 1 Gaseificador de Leito Fluidizado Borbulhante

A alimentação do combustível é feita sobre a placa de distribuição, a mesma responsável pela entrada de ar no interior do gaseificador. A temperatura de operação desses reatores situa-se na faixa de 700°C a 900°C , onde a temperatura é controlada a medida que aconteça uma variação da relação ar/combustível. O gás é retirado no topo desses gaseificadores, em que se encontra um ciclone que objetiva separar areia e as cinzas presentes no gás (MELO, 2008).

A figura 4.9 apresenta um esquema de um gaseificador de leito fluidizado borbulhante.

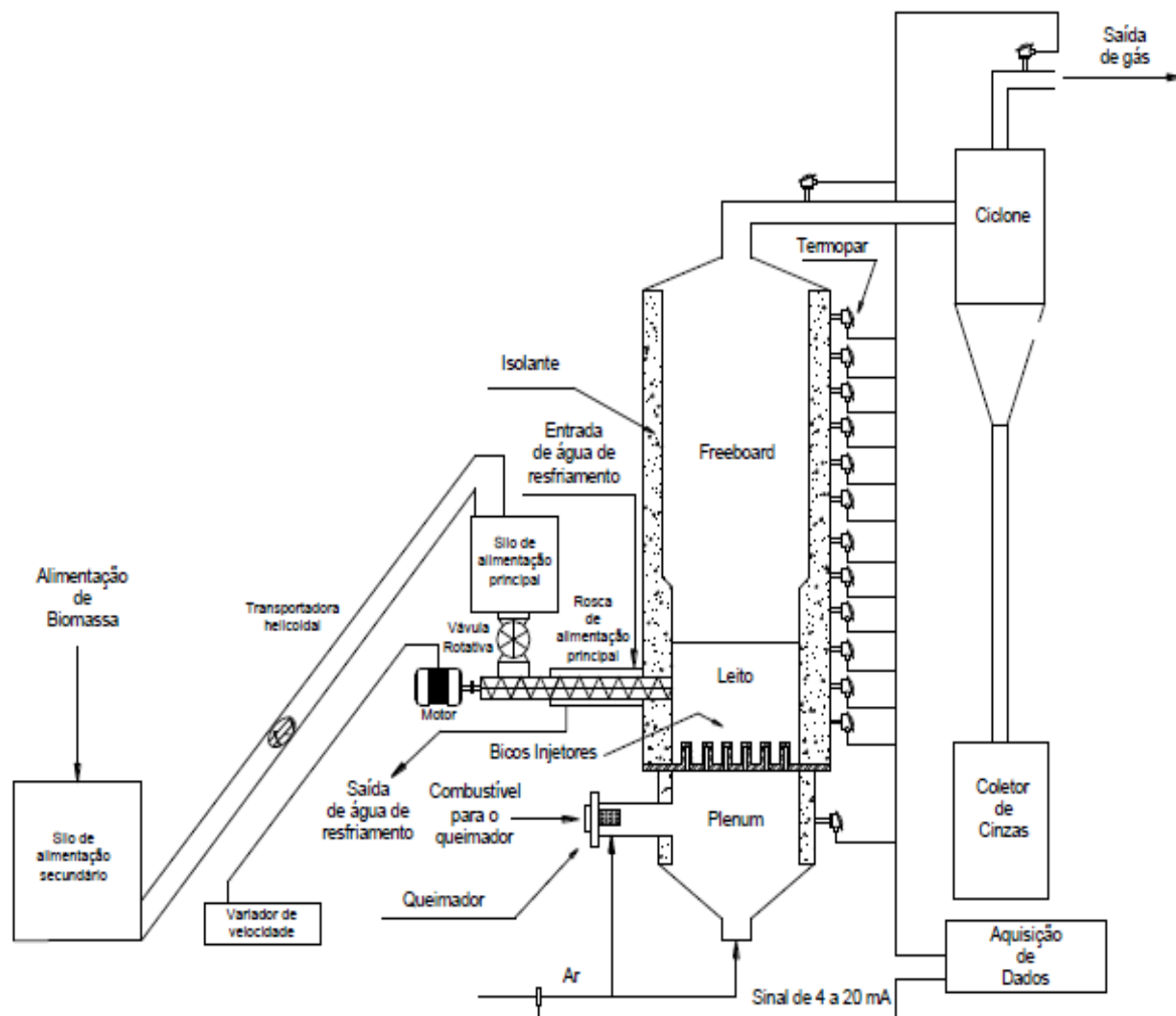


Figura 4.9 Esquema de um gaseificador de Leito Fluidizado Borbulhante (ANDRADE, 2013)

4.3.2.2 Gaseificador de Leito Fluidizado Circulante

Neste gaseificador, ocorre uma recirculação das partículas sólidas. Há também uma maior conversão de carbono durante o processo, justificada pelo tempo de residência das partículas combustíveis no reator e apresentam uma maior eficiência e capacidade específica (MELO 2008). A diferença entre o borbulhante e o circulante está na velocidade de fluidização, sendo de 0,5 a 1 m/s para o borbulhante e 3,5 a 5 m/s para o circulante (BASU, 2010 *apud* ANDRADE e LORA, 2013). A figura 4.10 apresenta um esquema deste gaseificador.

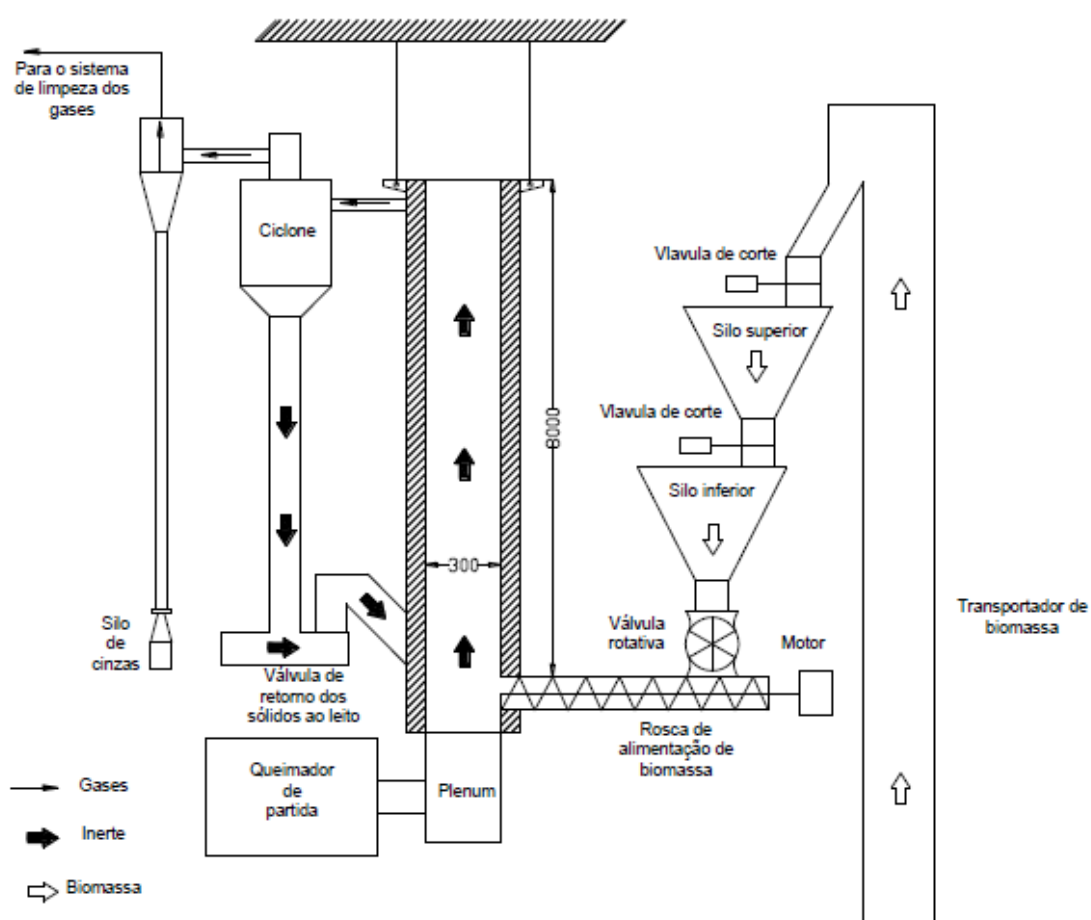


Figura 4.10 Esquema de um gaseificador de Leito Fluidizado Circulante (ANDRADE, 2013.).

4.3.3 Gaseificação de duplo leito

Neste equipamento, para que se tenha o fornecimento de energia necessária para os processos endotérmicos da gaseificação de vapor, a gaseificação se dá com vapor em um reator e a combustão com ar, em outro. Quando o combustível é queimado, o calor gerado por ele é transferido ao reator de gaseificação, tendo como ajuda, a mistura ocorrida entre o material do leito e as partículas que sobraram do processo de combustão. O gás gerado na gaseificação é de boa qualidade, com poder calorífico na faixa de 10 MJ/Nm^3 , uma vez que o ar que promove a combustão não é misturado com o gás gerado na gaseificação (ANDRADE, LORA, 2013).

Na Figura 4.11, é apresentado um esquema geral da gaseificação com duplo Leito.

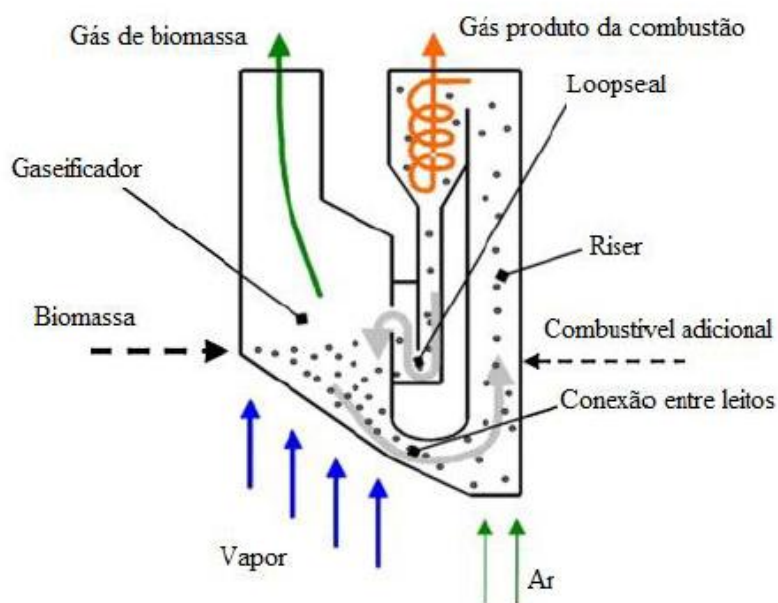


Figura 4.11 Esquema de um gaseificador de duplo leito (Ahamed, 2012 *apud* ANDRADE, 2013.).

4.3.3 Gaseificação de RSU

A produção excessiva de RSU per capita, tem se apresentado um problema comum entre todos os países desenvolvidos, nos quais a quantidade de material desperdiçado gerado pela sociedade tem caminhado para um nível que pode se tornar insustentável. Desta forma, há uma necessidade de continuar a se planejar e implementar estratégias de gestão e tratamento de resíduos. O sistema de gaseificação é formado por três elementos fundamentais: do gaseificador, útil na produção do gás combustível; o sistema de limpeza, necessário para remover compostos nocivos a partir do gás combustível; e o sistema de recuperação de energia. (SINGH *et al.*, 2011).

A tecnologia da gaseificação, embora apareça novidade para a recuperação energética de resíduos, ela é bastante antiga na história de conversões energéticas, tendo mais de 100 anos de existência. Atualmente, vem se destacando como uma das boas alternativas para contribuir na substituição dos combustíveis fósseis, uma vez que emitem uma menor quantidade de poluentes (KINTO *et al* 2003). Os gaseificadores são desenvolvidos para trabalharem com quase todos os tipos de combustível orgânico. Uma grande variedade de combustíveis, como vários tipos de madeira, resíduos agrícolas, óleos residuais e RSU. Na gaseificação, a capacidade de conversão de energia é limitada pela quantidade de biomassa em estoque, disponível para este fim (HENRIQUES, 2009).

Desta forma, as indústrias a fim de aproveitarem do potencial energético contido nos resíduos, bem como tentarem sanar ou ao menos diminuir os problemas de poluição, desenvolveram projetos de gaseificadores, nos quais os resíduos sólidos podem ser gaseificados, contribuindo tanto na mitigação de poluentes e doenças, quanto na geração de energia limpa, a partir dos gases de síntese originados com a gaseificação desses resíduos. Outra vantagem da gaseificação está no fato dela ocupar áreas menores do que as áreas destinadas à aterros .

A gaseificação pode ajudar o mundo a gerir os seus resíduos e produzir a energia e os produtos necessários para alimentar o crescimento econômico. Até mesmo nos processos de reciclagem, a gaseificação faz parcerias, uma vez que ela não compete com ela. Na verdade, ela ajuda a aumentar os programas de reciclagem. Os materiais podem e devem ser reciclados, sendo essa conservação incentivada. No entanto, muitos materiais, tais como metais e vidro, deve ser removido da corrente de RSU antes de serem alimentados no gaseificador, utilizando de sistemas de pré-processamento para realizar essa extração, resultando no aumento da reciclagem e utilização de materiais. Apesar disso, uma grande variedade de plásticos não pode ser reciclado sendo destinado a um aterro. Tais plásticos podem ser excelente matéria-prima energética para gaseificação. (gasification.org, 2014).

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2014), as fibras que constituem o papel e o papelão vão perdendo suas características físico- químicas durante os vários processos de reciclagem, chegando em determinado momento em que a qualidade desse material não é mais adequada para a reciclagem. Desta forma, ao invés de descartar esse resíduo, pode-se aproveitar do potencial energético contido neles por meio do processo da gaseificação.

É de suma importância que se leve em consideração dois aspectos a respeito dos resíduos, a fim de se obter um bom combustível, como a umidade, pois quanto maior a umidade, menor será o poder calorífico do gás e a granulometria que compõem a massa de RSU, pois quanto mais irregularidade tiver os resíduos, maior dificuldade terá na ocasião de alimentação do gaseificador. (LUZ, 2013).

Em sua revisão sobre gaseificação de resíduos sólidos, Arena (2011) faz algumas enumerações acerca das vantagens que essa tecnologia apresenta:

- Uma forte redução de massa e no volume de resíduos, aproximadamente 80%, preservando assim, o espaço do aterro;
- Drástica economia da terra, uma vez que essa tecnologia ocupa um espaço menor que os previstos para um aterro de RSU;
- Destruição dos contaminantes orgânicos, como derivados de hidrocarbonetos e halogênicos, bem como, a eliminação segura dos contaminantes inorgânicos;

- Redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), devido à decomposição anaeróbia dos resíduos orgânicos.

Outras vantagens da gaseificação desses resíduos também podem ser, Zafa (2001):

- Redução da procura de terras para a eliminação de resíduos,
- Redução no custo de transporte, já que os RSU não seriam obrigados a ser transportados para um lugar tão distante para o despejo,
- Viabilidade comercial, ou seja, a partir da gaseificação dos resíduos, pode-se obter rendas com a venda de energia,
- Requer equipamentos de limpeza de gás mais baratos,
- A gaseificação produz um gás combustível, que pode ser integrado com turbinas de ciclo combinado, motores convencionais convertendo a energia do combustível em eletricidade, de forma mais eficiente do que as caldeiras a vapor convencionais.

De acordo com Tanigaki *et al* (2011) *apud* Barros, (2012), a gaseificação de RSU e biomassa tem sido muito pesquisada em todo mundo, a fim de investir em um método de recuperação de energia. No Japão, há algumas centrais de gaseificação de RSU que estão em operação comercial para a recuperação de energia e material.

De acordo com Luz (2013), uma planta para a gaseificação de biomassa para a geração de energia deve incluir os seguintes itens (Figura 4.12):

- a) Sistema de manuseio e alimentação dos resíduos no reator de gaseificação (recepção dos RSU, triagem, trituração, secagem, briquetagem e armazenamento).
- b) O reator de gaseificação (leito fixo, leito fluidizado borbulhante ou circulante, leito arrastado).
- c) Sistema de limpeza dos gases produzidos na gaseificação (ciclone, filtro de mangas, reator catalítico, lavador de gases).
- d) Sistema de remoção, transporte e disposição das escórias e/ou cinzas resultantes.
- e) Sistema de conversão de energia (motor alternativo de combustão interna e gerador elétrico).

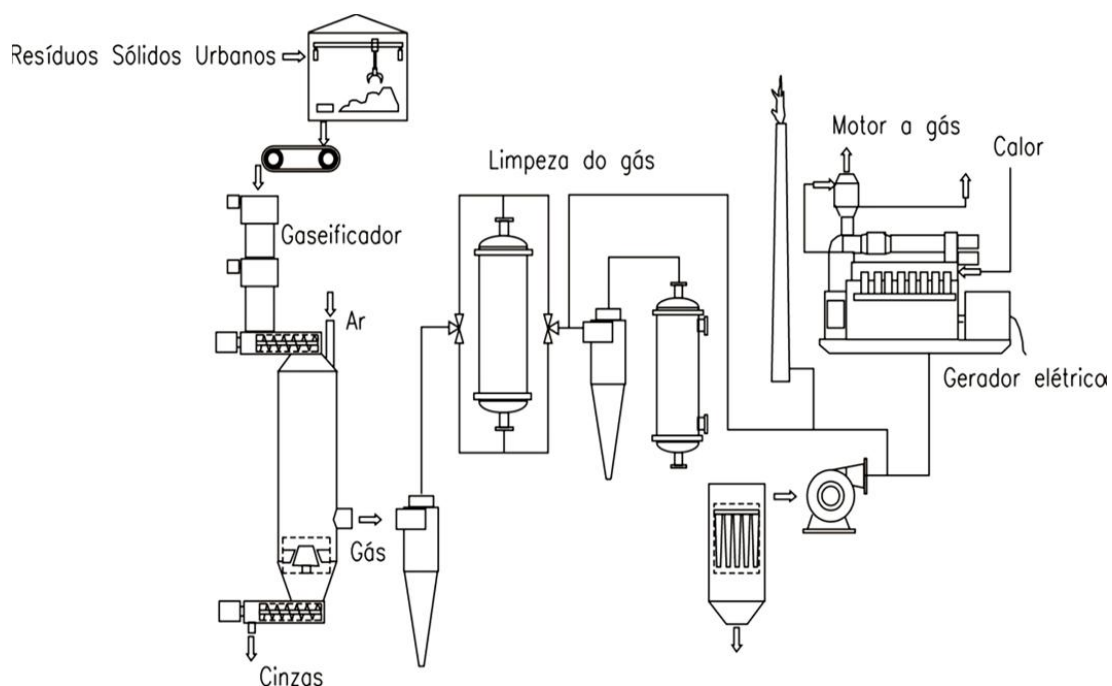


Figura 4.12: Fluxograma do processo de gaseificação (LUZ, 2013).

Em diferentes soluções tecnológicas, a utilização do RSU, pode apresentar eficiências maiores ou menores. Na tabela 4.5 apresenta as vantagens da gaseificação, principalmente quando se utiliza MCI.

Tabela 4.5: Eficiências para diferentes tipos de energia proveniente de RSU

Características	Combustão de RSU (%)	Gaseificação de RSU para MCI (%)	Gaseificação de RSU para TG (%)
Eficiência na conversão térmica	80	70	70
Eficiência na geração de potência	31	38	30
Eficiência na geração elétrica	25	27	21
Eficiência na geração térmica	0	45	42
Eficiência na energia térmica	0	32	29
Utilização do combustível	25	58	50

Fonte: (GENON, DURANTE *et al.*, 2010 *apud* LUZ, 2013).

4.3.3.1 Combustível derivado de resíduos (RDF)

Os RSU para serem processados no gaseificador passam por um processo de tratamento, não podendo ser alimentados diretamente no gaseificador, sendo formado o RDF, ou combustível derivado de resíduos. O RDF tem demonstrado que é um substituto eficaz para combustíveis fósseis, uma vez que apresentam baixo custo de produção e um poder calorífico significativo (LUZ, 2013).

O RDF compreende uma grande variedade de material, nos quais pode-se citar, a matéria orgânica do RSU, os plásticos e resíduos biodegradáveis, lodo de esgoto, e resíduos agrícolas. A transformação de resíduos em RDF atende a dois propósitos principais: reduzir o volume de resíduos em aterros sanitários e fornecer combustíveis alternativos às indústrias que fazem uso intensivo de energia (GENDEBIEN, *et al.*, 2003 *apud* LUZ, 2013).

A composição média dos RDF pode variar em relação aos materiais constituintes básicos, como plásticos, papéis, matéria orgânica, tecidos, etc, como é apresentado na figura 4.13.

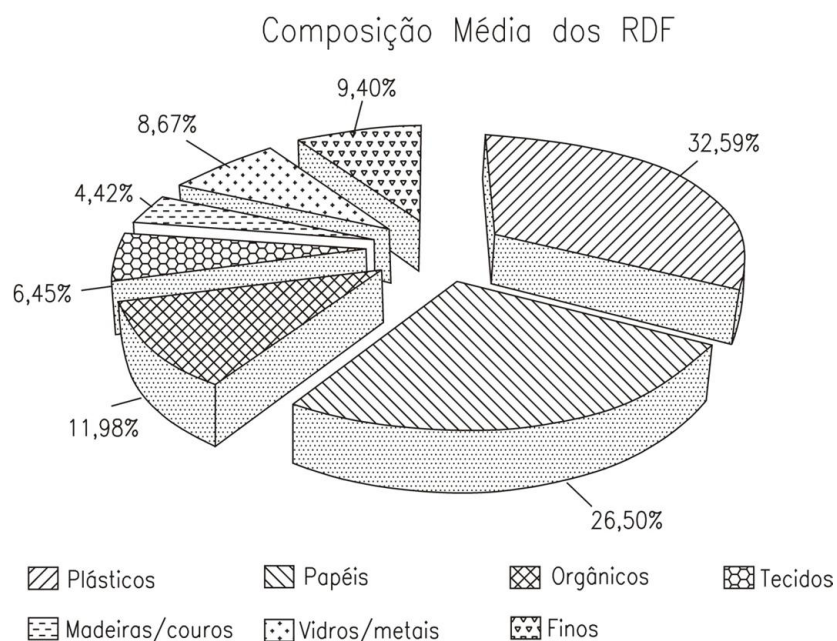


Figura 4.13: Composição média dos RDF ((VOUNATSOS, *et al.*, 2012 *apud* LUZ, 2013).

Outros fatores em relação a composição dos RDF em relação a sua análise elementar, imediata, poder calorífico e metais pesados, podem ser verificados na tabela 4.6.

Tabela 4.6: Composição dos RDF

Parâmetro	Unidade	RDF
Umidade	%	30,4
Cinzas	%	16,2
Voláteis	%	46,1
PCS	MJ/kg	14,80
PCI	MJ/kg	13,20
C	%	28,10
H	%	3,40
N	%	0,98
S	%	0,32
O	%	66,95
Pb	mg/kg seco	71,2
Cu	mg/kg seco	66,3
Zn	mg/kg seco	1,97
As	mg/kg seco	2,1
Mn	mg/kg seco	164
Cr	mg/kg seco	25,2
Na	mg/kg seco	5,36

Adaptada de WAGLAND, KILGALLON *et al.*, 2011

Neste processo de formação do RDF, os RSU são submetidos a um processo de tratamento que tem por objetivo reduzir o volume inicial do material, obtendo um aumento significativo do seu poder calorífico, podendo assim, fornecer um combustível de maior facilidade de manipulação, transporte e utilização. Este procedimento favorece um aumento na eficiência, bem como ajuda a reduzir a produção de cinzas na conversão do processo. Os principais processos de produção de RDF são: separação na fonte, triagem ou separação mecânica, redução do tamanho das partículas (retalhamento, moagem), secagem, homogeneização/densificação, embalagem e armazenamento (PERNES, 2008).

Ainda segundo os autores (op.cit.), os RDF podem ser classificados de diferentes maneiras quanto a sua forma, podendo ser desagregado, pellets e briquetes:

- Desagregado: material solto, de baixa densidade, que tem a característica de se transportável pelo ar.
- Pellets: RDF produzido por aglomeração de material solto em cubo, disco ou cilindro. O diâmetro ou seu equivalente é geralmente inferior a 25 mm.
- Briquete: bloco ou cilindro de RDF produzido por aglomeração de material solto. O diâmetro ou seu equivalente é superior a 25 mm.

Primeiramente, o resíduo é submetido a um peneiramento para remover a fração reciclável como, por exemplo, metais e vidros. O material é composto principalmente por resíduos de comida, papel, alguns plásticos (recicláveis e não recicláveis), material orgânico (resíduos de madeira e outros materiais). Após a separação dos materiais, o restante é reduzido a uma granulometria inferior a 100 mm para posterior manipulação. Com esse processo, pode-se conseguir uma redução de até 50% no volume de RSU em relação ao volume que entrou no processo (LUZ, 2013).

Antes da compactação, o RDF é submetido a um processo de secagem até atingir uma umidade em torno de 12%. Depois, usa-se fazer um peneiramento a fim de remover possíveis contaminantes neste material. Após as etapas descritas acima, o material está pronto para a densificação e/ou peletização (cubos, pelotas, pellets, briquetes), contanto que atenda a norma CEN/TC 335(BELBO, 2006).

Após a passagem do RSU pela etapa de triagem para separação de metais, vidros, pedras, dentre outros, seguem para a próxima seção, onde o objetivo é produzir o RDF na forma de briquetes, passando pelas etapas da secagem, trituração e compactação do RSU. Os briquetes de RDF são formados por pequenas partículas de material residual, que são, prensadas para formar blocos de forma definida e de maior tamanho. Depois de produzidos os briquetes de RDF, estes combustíveis devem ser transportados e armazenados em um local próximo ao gaseificador escolhido, a fim de facilitar a alimentação no equipamento. Para isso, deve-se escolher o local isolado, completamente identificado e sinalizado, longe de fontes de calor e ventilado adequadamente, para que não ocorra a produção de misturas, resultando em um possível incêndio. (LUZ, 2013). A figura 4.14 apresenta o esquema de triagem dos RSU.

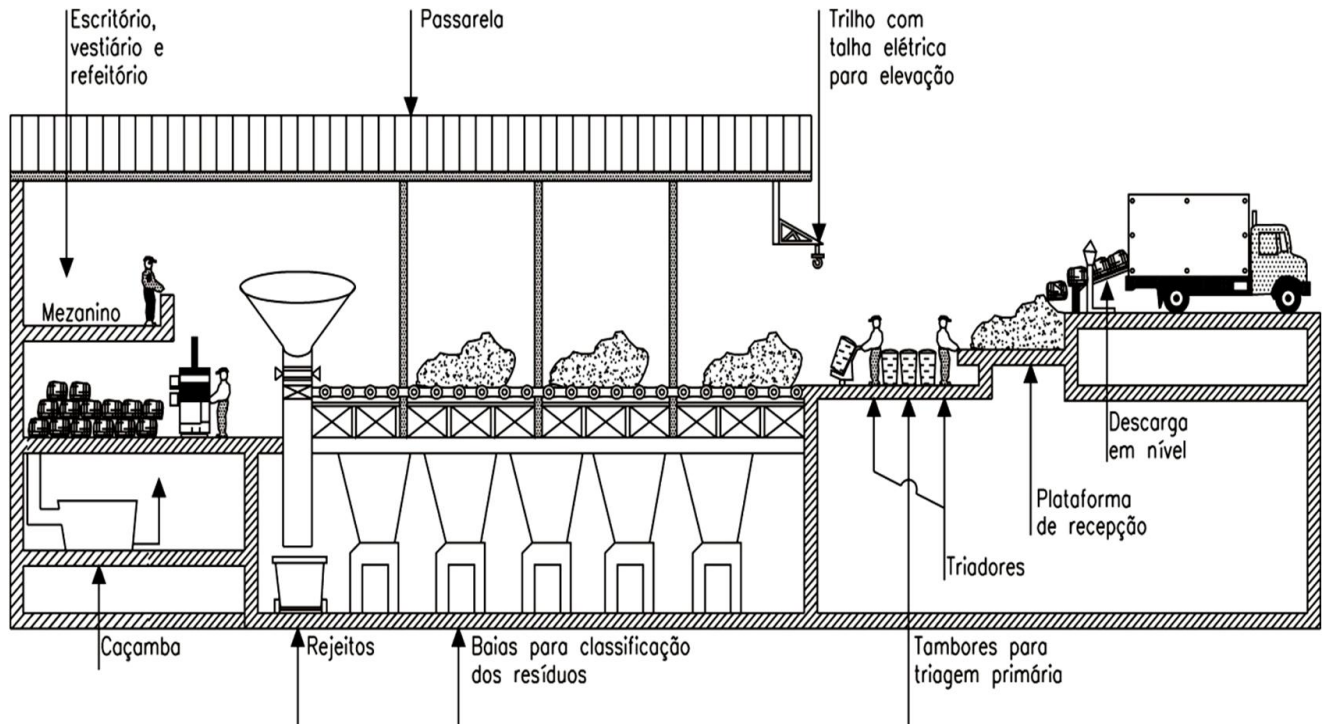


Figura 4.14 Esquema de recebimento e triagem dos RSU (LUZ, 2013).

4.3.4 Parâmetros que influenciam a gaseificação

Durante a gaseificação, alguns parâmetros podem influenciar o processo, como os agentes de gaseificação, o fator de ar, a temperatura do leito, como é apresentado a seguir:

- Fator de ar:

Essa variável corresponde à razão ar/combustível real e teórica (estequiométrica) utilizada durante o processo, como é apresentada na equação 4.5:

$$FA = \frac{\left(R_{A/C} \right)_{real}}{\left(R_{A/C} \right)_{est}} \quad \text{Eq.4.5}$$

Esta razão define a proporção de combustível queimado, logo, com combustão completa, com relação à quantidade que é gaseificada, que é uma oxidação parcial do combustível (MARTÍNEZ, 2009).

- Temperatura do Leito:

A temperatura do leito é basicamente direcionada a partir das quantidades de ar e combustível que participam na reação e da composição elementar do combustível a ser gaseificado. No entanto, espera-se que a temperatura durante o processo seja adequada, para que o carbono presente no combustível possa ser transformado por completo, evitando assim, um acúmulo desnecessário nas cinzas (MARTÍNEZ, 2009).

- Teor de Alcatrão no gás obtido:

A presença de alcatrão no gás gerado pelo combustível pode causar sérios danos ao equipamento, podendo este ser até desativado antes do término da sua vida útil. Sendo assim, essa concentração de alcatrão presente no gás é muito importante, relacionando-se diretamente com a qualidade do gás. O alcatrão é composto por hidrocarbonetos e principalmente, por compostos poliaromáticos (MELO, 2008).

- Composição do gás obtido:

De acordo com Melo (2008), os principais componentes gerados pela gaseificação da biomassa são o monóxido de carbono (CO), o hidrogênio (H₂), o metano (CH₄), os inertes, dióxido de carbono (CO₂) e o nitrogênio (N₂). O percentual de cada componente gerado depende das condições em que o equipamento foi operado durante o processo.

- Agente oxidante:

Os principais agentes oxidantes são o ar, o oxigênio puro e o vapor de água. Esses agentes são responsáveis não somente por influenciar o processo como o poder calorífico, o teor de alcatrão e na operação dos equipamentos, mas também influenciar no resultado final, que é a qualidade do gás gerado (MELO, 2008).

Em processos em que se utilizam de ar como agente oxidante, a produção do gás combustível apresenta concentrações relativamente altas de nitrogênio e um poder calorífico baixo, cerca de 5 MJ/Nm³, sendo este considerado um gás pobre. Caso o agente oxidante seja o oxigênio ou o vapor de água, ou até mesmo uma mistura deles, as concentrações dos gases produzidos irá aumentar, podendo atingir 18 MJ/Nm³, (MCKENDRY, 2003 *apud* MARTÍNEZ, 2009).

5. Metodologia

A metodologia deste trabalho consiste em uma análise técnica feita para duas tecnologias de aproveitamento energético do gás gerado a partir dos RSU, o biogás formado a partir da degradação desses resíduos em um aterro sanitário e a do gás gerado por meio da gaseificação dos RSU. Os resíduos fazem parte dos municípios integrantes do aterro sanitário escolhido para o estudo de caso, neste caso, o de Itajubá-MG, do consórcio CIMASAS.

A primeira forma de aproveitamento energético é o caso do biogás gerado a partir da degradação desses resíduos no aterro sanitário. Assim sendo, contou-se com os planos de gerenciamento integrado dos resíduos sólidos e da quantidade de resíduos que chegava ao aterro por ano, de cada município integrante do consórcio. Foi também escolhida uma metodologia de estimativa de geração de biogás, neste caso, a do IPCC (2006) e também a utilização de um software desenvolvido pelo NEST, para realizar esta estimativa. A partir deste software foi possível estimar médias de conversão em energia elétrica ao decorrer de vinte anos, que é o tempo de vida útil do aterro. Ainda nesta primeira forma de aproveitamento energético, foi possível fazer uma comparação com a quantidade de energia convertida, com o consumo anual de cada município do consórcio, a partir de dados cedidos pela CEMIG. A tecnologia escolhida para a conversão em energia elétrica neste caso, foi o motor de combustão interna e sua análise foi feita para dois períodos, primeiro para o funcionamento de um motor e depois quando há o funcionamento de dois motores, uma vez que a produção de biogás varia com o decorrer dos anos.

Já a forma de aproveitamento energético do gás gerado pela gaseificação dos RSU foi feita também utilizando dos dados de cada município e da respectiva quantidade de sua deposição no aterro. No entanto, para se determinar a estimativa da conversão em energia elétrica decorrente desses resíduos, foram feitos vários cálculos onde as fórmulas são conceituais e disponíveis mais adiante no presente texto. Foi escolhido para esta análise, o gaseificador co-corrente e o motor de combustão interna. Assim, para que se determinasse de maneira mais eficaz os cálculos para a gaseificação dos resíduos, considerou-se a formação de briquetes a partir do RDF, já que os resíduos não podem ser depositados no gaseificador da mesma forma que chega ao aterro, necessitando um tratamento prévio. Desta forma, foi retirada a quantidade de resíduos com potencial de reciclagem e utilizando somente, o restante para a gaseificação.

5.1 Análise para o aproveitamento energético do gás de aterro sanitário (biogás)

5.1.1 Estudo de Caso do Aterro Sanitário Escolhido para Análise

O estudo de caso deste trabalho consiste no município de Itajubá, localizado na região Sul do estado de Minas Gerais, onde está o aterro sanitário que atende além do município de Itajubá, também os municípios de Delfim Moreira, Piranguçu, Piranguinho, São José do Alegre e Wenceslau Braz que fazem parte do CIMASAS, um consórcio intermunicipal dos municípios do Alto do Sapucaí para aterro sanitário. A coleta de dados foi feita na secretaria do CIMASAS com o secretário executivo engenheiro ambiental Josué Meystre, que forneceu os Planos de Gerenciamento de resíduos sólidos de cada município integrante do consórcio.

5.1.2 Caracterização do Município

Itajubá abrange uma área de 290,45 km² de extensão e possui 94.940 habitantes (IBGE, 2013). O índice pluviométrico anual médio é de 1.354 mm. A cidade faz divisa com os municípios de São José Alegre, Maria da Fé, Wenceslau Brás, Piranguçu, Piranguinho e Delfim Moreira. A cidade é servida por uma malha viária que se apoia nas rodovias federais Fernão Dias e Dutra, cujo acesso é feito pela BR-459. Na Figura 5.1 é mostrada a localização do município de Itajubá/MG (GONÇALVES *et al.* 2007).

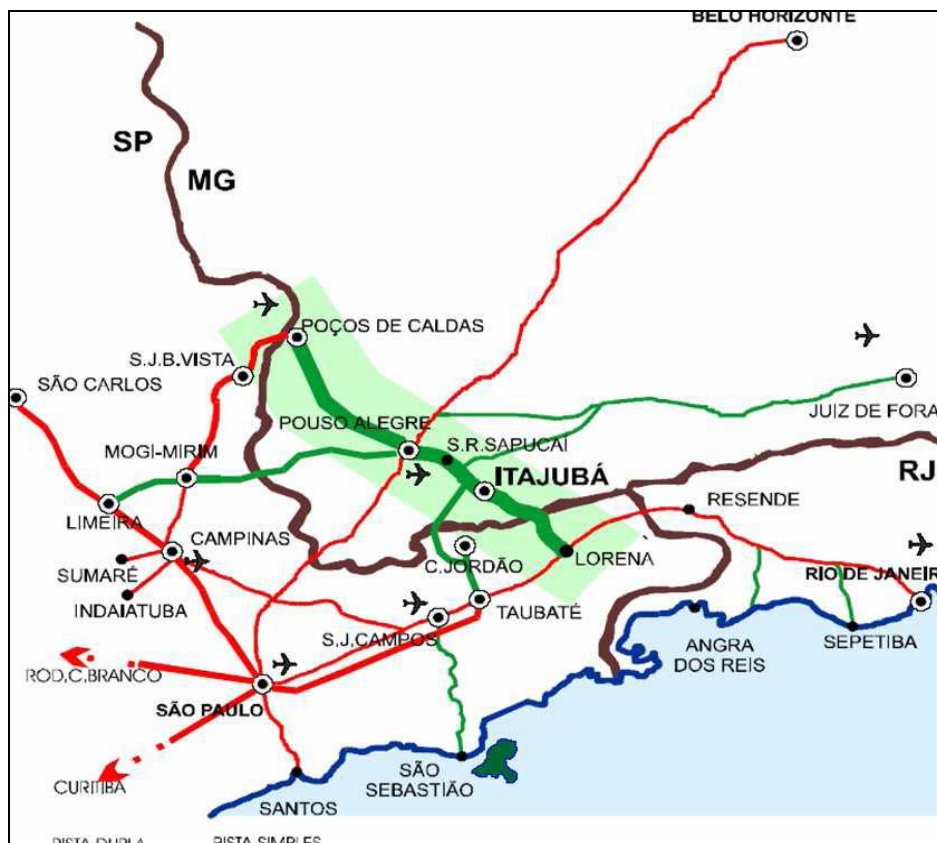


Figura 5.1: Localização da cidade de Itajubá (GONÇALVES *et al*, 2007).

O sistema de limpeza urbana do município é vinculado à Secretaria Municipal de Obras Públicas (SEMOP), sendo a maior parte dos serviços terceirizados e outros realizados pela própria prefeitura. Os serviços constituem em varrição de logradouros públicos, limpeza de bocas-de-lobo, capina roçada, poda, limpeza de córregos, coleta regular e disposição final dos RSU. O serviço de coleta, transporte e disposição final dos resíduos sólidos domiciliares no atual depósito de resíduos é realizado por empresa terceirizada, assim como o serviço de varrição de logradouros públicos, limpeza de bocas-de-lobo, capina roçada e poda (GONÇALVES *et al*, 2007).

5.1.3 Caracterização do Aterro Sanitário de Itajubá

O aterro sanitário está localizado na estrada do Pessegueiro s/n bairro Rancho Grande, antiga fazenda Rancho Grande. A obra faz parte do projeto piloto do Governo de Minas para solucionar o problema dos lixões no Estado. A figura 5.2 apresenta uma visão geral do aterro.



Figura 5.2: Visão geral do Aterro Sanitário de Itajubá (PGIRSU, 2007).

Inicialmente, os RSU de Itajubá eram depositados em um lixão sem nenhum controle ambiental, causando impactos ambientais e gerando riscos a saúde pública, como a presença de catadores de materiais nos vazadouros. Em 2006, passou a ser um aterro controlado, melhorando substancialmente a sua situação. Somente a partir do ano de 2010 que os RSU do município passaram a ser dispostos em um aterro sanitário, com licença de operação da FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente).

O aterro iniciou suas operações em Janeiro de 2010. Os sistemas de disposição e tratamento de RSU que compreendem o aterro sanitário são lagoa de tratamento de chorume (digestor anaeróbio e lagoa facultativa), os taludes de recobrimento e canais para saída pluvial, percolados e drenos para saída de biogás. O aterro recebe RS domiciliar e comercial dos municípios já citados. (GONÇALVES *et al*, 2007).

A área total do terreno é de 56,93 hectares. Dessa área total, foi delimitada uma área de 29,95 hectares a ser efetivamente utilizada para a implantação do projeto. O terreno restante, com área de 26,97 hectares, foi definido com área de reserva técnica ou de expansão futura do aterro sanitário, onde terá também como finalidade a de estocagem de material terroso excedente dos serviços de terraplenagem e a de empréstimo de material terroso, caso seja necessário, para a implantação de etapas posteriores ou para operação do empreendimento (GONÇALVES, 2007).

Segundo o Censo de 2010 (IBGE, 2010), a população total do CIMASAS no ano de 2010 era de 118.424 habitantes, sendo que o município com o maior número de habitantes é o município de Itajubá. A população do CIMASAS pode ser verificada na tabela 5.1:

Tabela 5.1: População total do CIMASAS em 2010

Municípios do Cimasas	Total de habitantes
Itajubá	90.658
Piranguinho	8.016
Piranguçu	5.217
São José do Alegre	3.996
Wenceslau Bras	2.553
Delfim Moreira	7.971

(IBGE, 2010)

De acordo com Gonçalves (2007), o aterro sanitário do município de Itajubá-MG conta com as seguintes unidades:

- Unidade de aterragem para disposição final dos resíduos sólidos de origem domiciliar e comercial, do RS séptico gerado nos estabelecimento de saúde do município (exceto aqueles que devem ter tratamento e disposição final específicos, em conformidade com a Resolução CONAMA 358/2005) e das carcaças de animais mortos coletados pela Prefeitura;
- Edificação de apoio operacional (escritório, varanda, refeitório, vestiário e estacionamento para visitantes);
- Galpão para guarda e manutenção de veículos e equipamentos;
- Guarita e balança rodoviária para controle do acesso ao empreendimento;
- ETE – Estação de Tratamento de Efluentes.

Foi estimado como necessário, no mínimo, dez funcionários efetivos e seis temporários, para trabalharem no aterro. Essas unidades foram projetadas para comportar uma vida útil de aproximadamente 20 anos, considerando-se que 100% dos resíduos gerados na sede do

município de Itajubá sejam encaminhados ao aterro sanitário no decorrer da vida útil projetada. No caso de ampliação das campanhas de coleta seletiva de forma efetiva e abrangente terá que haver, conseqüentemente, um aumento na vida útil projetada (GONÇALVES *et al*, 2007).

As figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam algumas imagens do aterro sanitário de Itajubá. A figura 5.3 apresenta uma vista do aterro mostrando os taludes onde são depositados os resíduos. A figura 5.4 apresenta uma vista do aterro onde aparecem alguns dos drenos de biogás e canais para escoamento pluvial, bem como caixa de saída de percolados.



Figura 5.3: Talude para deposição de resíduos (PAIVA, 2012).

O Sistema de impermeabilização é feito por meio de manta PEAD 1,5, sobre o qual há um sistema de escoamento pluvial através de canais ao redor das plataformas do aterro, auxiliando na redução da vazão de percolado.



Figura 5.4: Talude para deposição de resíduos com algumas disposições de drenos (PAIVA, 2012).

A figura 5.5 trata-se do sistema de tratamento de percolados composto por digestor anaeróbio³, seguido de uma lagoa facultativa³.

3- Esse reator anaeróbio é um reator fechado cujo tratamento biológico ocorre pelo processo anaeróbio, onde não há presença de oxigênio. A decomposição da matéria orgânica é feita pelos microorganismos presentes em um manto de lodo. Desta forma, o esgoto sai da parte de baixo do reator, passando pela camada de lodo que atua como um filtro. A eficiência pode atingir até 75% necessitando de um tratamento complementar que pode ser feito por meio da lagoa facultativa, a qual pode ter de 1,5 a 3 metros de profundidade e apresenta as condições aeróbias, que são mantidas nas camadas superiores das águas e as anaeróbias, predominando as camadas próximas ao fundo da lagoa. (SABESP, 2014).



Figura 5.5: Lagoa de tratamento de chorume (PAIVA, 2012).

O sistema de saída de gás é feito com manilhas preenchidas com pedras de mão. A figura 5.6 apresenta um dreno de biogás do aterro.



Figura 5.6: Dreno de biogás (PAIVA, 2012).

5.1.4 Caracterização dos resíduos das cidades integrantes do aterro.

Para se fazer uma estimativa correta da geração de biogás, é necessário saber a composição gravimétrica dos resíduos sólidos recebidos; para tanto, é preciso fazer um gerenciamento dos resíduos dos seis municípios que depositam os seus RSU no aterro. Essa caracterização dos resíduos permite a obtenção dos valores de contribuição de resíduos per capita (kg/habitante x dia) e dos percentuais da composição gravimétrica dos resíduos domiciliares (matéria orgânica, materiais recicláveis e rejeitos).

Esta análise foi baseada no documento - Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos (PGIRSU) de cada um dos seis municípios pertencentes ao consórcio do CIMASAS, produzido pelo seu Núcleo Gestor (GONÇALVES *et al*, 2007).

5.1.5 Município de Itajubá

➤ Resíduos sólidos domiciliares e comerciais

O município apresenta um projeto de coleta de resíduos de área urbana de 100% e da área rural cerca de 85% de resíduos coletados. A coleta feita são de resíduos sólidos comerciais e domiciliares, utilizando de seis caminhões, dos quais cinco são compactadores. O caminhão que não é compactador é utilizado na zona rural. As coletas são feitas de segunda a sábado em horários alternados.

➤ Caracterização dos resíduos sólidos domiciliares e comerciais

O plano de gestão dos resíduos sólidos segue a caracterização qualitativa e quantitativa dos RSU realizadas em 2003, onde foi realizada a caracterização física dos resíduos sólidos domiciliares do município pela Cooperativa de Serviços e Pesquisas Tecnológicas e Industriais (CPTI) contratada para elaborar um projeto de aterro sanitário para a cidade. No entanto, Gonçalves (2007), também fez esta caracterização dos resíduos.

5.1.6 Município de Delfim Moreira

➤ **Resíduos sólidos domiciliares e comerciais**

O município de Delfim Moreira é uma cidade de pequeno porte. Em sua estrutura orgânica, não há uma unidade administrativa designada para serviços de limpeza urbana. A execução, o planejamento e o controle de todos os serviços de limpeza urbana são de competência da divisão de vias públicas subordinado à secretaria municipal de obras e vias públicas. (MOTTA *et al.* 2007).

➤ **Caracterização dos resíduos sólidos domiciliares e comerciais**

A caracterização dos resíduos comerciais e domiciliares realizados no município de Delfim Moreira, foi feita a partir de uma campanha realizada em novembro de 2006, em que a metodologia foi baseada em CETEC (Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 2007). Tal metodologia, contava com o trabalho dos funcionários da limpeza urbana do município, com o apoio dos integrantes do núcleo gestor e com a presença dos alunos da Fundação Roge. (MOTTA *et al.* 2007).

5.1.7 Município de Piranguçu

➤ **Resíduos sólidos domiciliares e comerciais**

O município de Piranguçu, não apresenta uma unidade administrativa designada para limpeza urbana; suas atribuições são da competência do departamento de obras e serviços. O serviço de capina e poda é terceirizado, sendo realizado conforme a necessidade, e seu planejamento realizado pelo município. A coleta de resíduos sólidos domiciliares e comerciais é realizada duas vezes por semana, ocorrendo nas terças e sextas-feiras com roteiros diferentes para os dois dias de coleta. (RIBEIRO *et al.*, 2007).

➤ **Caracterização dos resíduos sólidos domiciliares e comerciais**

A realização da triagem dos resíduos gerados na zona urbana do município de Piranguçu ocorreu em Itajubá, devido à facilidade no descarte posterior destes resíduos, uma vez que o mesmo é realizado em Itajubá. O local definido para realização das atividades foi em uma área que comercializa materiais recicláveis, sendo que este se encontra em Itajubá no trajeto do aterro

controlado. Todo o trabalho foi acompanhado por técnicos da Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Itajubá e por técnicos da Prefeitura de Piranguçu. (RIBEIRO *et al.*, 2007).

5.1.8 Município de Piranguinho

➤ Resíduos sólidos domiciliares e comerciais

A coleta de resíduos domiciliares e comerciais é realizada em todos os bairros da Zona Urbana (porta a porta) e em 15 regiões da Zona Rural. Na zona rural ocorre na modalidade ponto a ponto, em que o morador leva os resíduos para a lixeira comunitária mais próxima de sua residência, muitas vezes os RS residenciais são queimados ou descartados a esmo, sem nenhum controle, sendo esta uma prática de pequena parcela da população rural. Conforme informações apuradas junto ao corpo técnico da prefeitura, verificou-se que a coleta de resíduos domiciliares / comerciais abrange 100 % da área urbana, e é realizada em 80% das áreas rurais, nestas existindo as lixeiras instaladas em pontos escolhidos (ASSIS *et al.*, 2007).

➤ Caracterização dos resíduos sólidos domiciliares e comerciais

A caracterização dos RSU ocorreu entre os dias 14 de setembro de 2006 a 20 de setembro de 2006. Os resíduos, ao chegarem da coleta convencional, foram despejados em uma lona plástica (36 m²) e acondicionados em sacolas plásticas misturadas. Após o revolvimento, foram quarteados e selecionados, procedendo-se, após isso, a um novo quarteamento, resultando na etapa de triagem qualitativa e classificação quanti-qualitativa dos resíduos (ASSIS *et al.*, 2007).

5.1.9 Município de São José do Alegre

➤ Resíduos sólidos domiciliares e comerciais

O gerenciamento dos serviços de limpeza urbana do município de São José do Alegre é de responsabilidade da secretaria municipal de obras e serviços urbanos. A coleta convencional residencial e comercial é feita três vezes por semana (2^a, 4^a e 6^a feiras) entre o horário das 7:00 às 16:00 horas (DIAS *et.al.*, 2007).

➤ Caracterização dos resíduos sólidos domiciliares e comerciais

O trabalho de caracterização dos resíduos sólidos foi realizado por uma equipe técnico – operacional da Prefeitura, nos dias 20, 22 e 25 de setembro do ano de 2005. Uma das

caracterizações foi feita no dia 22 de setembro no pátio da Prefeitura e contou com a colaboração de 9 pessoas, das quais 3 eram funcionários da limpeza urbana. A caracterização aconteceu no mesmo dia, no período das 7:00 às 11:00 e utilizou uma parcela dos RS coletados. As pessoas envolvidas separaram o material em 4 partes distintas para obtenção dos quartis, para realização do quarteamento (DIAS *et.al.*, 2007).

5.1.10 Município de Wenceslau Bras

➤ Resíduos sólidos domiciliares e comerciais

As atribuições da limpeza urbana fazem parte das competências da secretaria de indústria, comércio, agropecuária, obras, estradas e serviços urbanos. Não existe uma estrutura por parte da prefeitura, uma unidade administrativa designada para a limpeza urbana, sendo o diretor de obras, estradas e serviços urbanos, o responsável por estes serviços. Conforme informações apuradas junto ao corpo técnico da Prefeitura verificou-se que a coleta de resíduos domiciliares / comerciais, abrange praticamente todo o município (BARBOSA FILHO *et.al.*, 2007).

➤ Caracterização dos resíduos sólidos domiciliares e comerciais

O trabalho baseou-se na metodologia repassada do CETEC. Primeiramente, foram separadas bombonas por tipo de material reciclável, depois se iniciou o processo de abertura dos sacos de amostras de resíduos sobre uma lona grande. Depois de desensacados todas as amostras fizeram-se a separação dos resíduos e posteriormente, a pesagem de cada tipo (BARBOSA FILHO *et.al.*, 2007).

5.1.11 Quantidade de Resíduos e composição gravimétrica dos municípios

Nos anos de 2010 a 2012, o CIMASAS, recebeu uma quantidade de resíduos de cada município no aterro. No entanto, um município, o de Itajubá, cuja população é maior, sobressaiu-se em relação aos demais em todos os anos de despejos, o que pode ser verificado na figura 5.7.

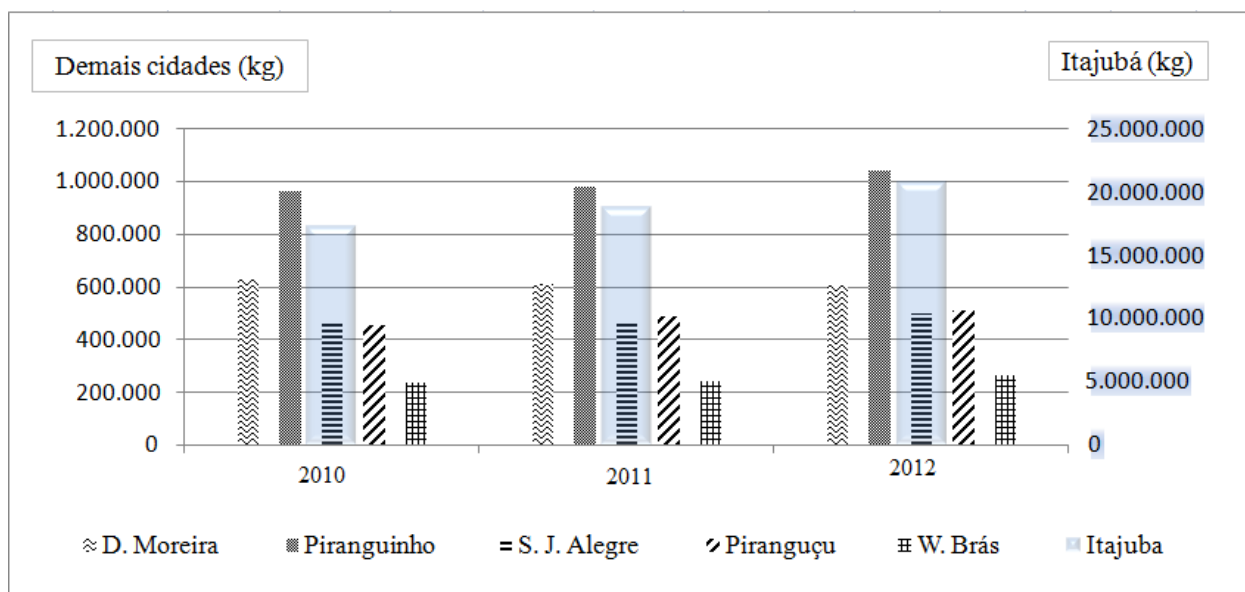


Figura 5.7: Quantidade de resíduos que cada município depositou no aterro sanitário no período de 2010 a 2012 (CIMASAS, 2013).

Em relação a composição gravimétrica dos municípios; cada um teve seu procedimento, realizado para os resíduos domiciliares e comerciais. De maneira geral, todos passaram por processos de triagem e foram quarteados e selecionados, resultando em uma classificação quantitativa dos resíduos. Todos os municípios fizeram esta análise nos anos de 2007.

Sendo assim, pode-se obter o resultado desta composição em relação aos diversos componentes, de todos os municípios integrantes do consórcio em porcentagem, como é apresentado na figura 5.8.

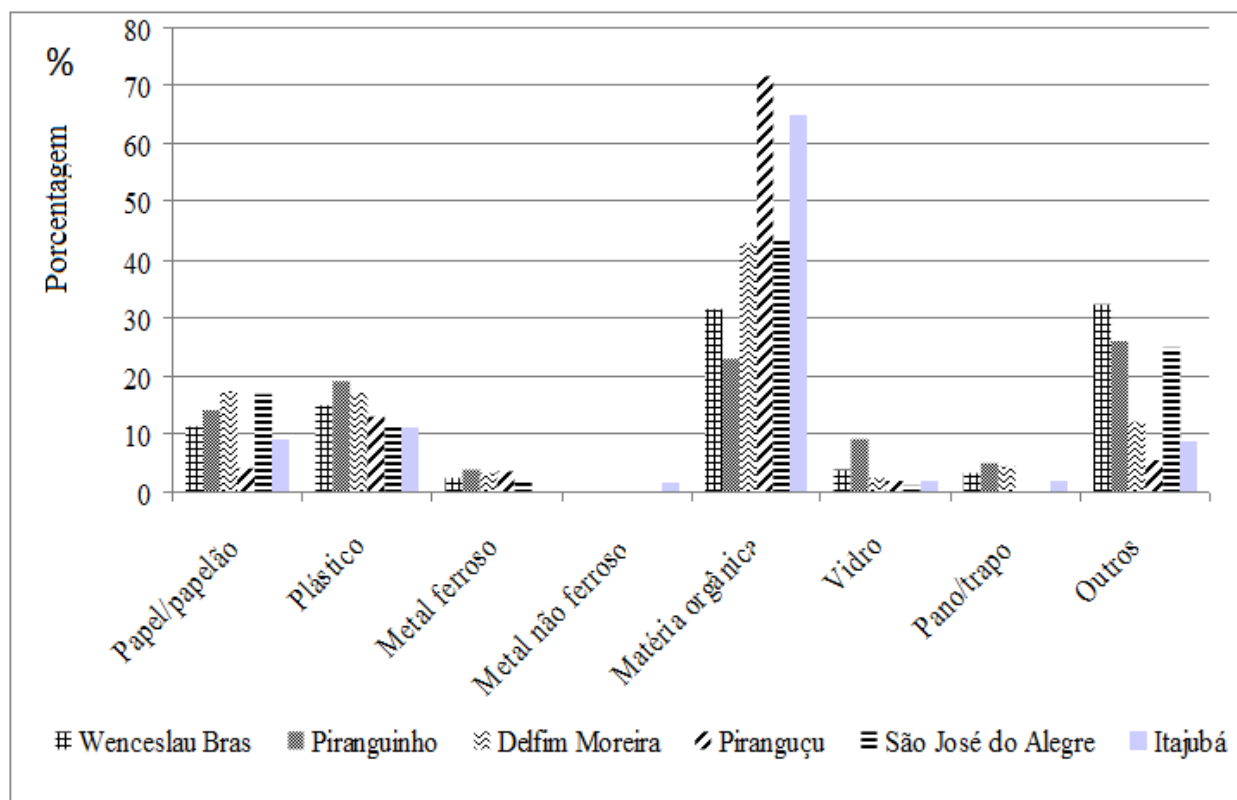


Figura 5.8: Composição gravimétrica dos resíduos de cada município pertencente ao CIMASAS. (Adaptado de:Silva e Costa (2003) *apud* Gonçalves (2007); Assis *et al.*(2007); Barbosa Filho, *et.al.*(2007); Motta *et al.*(2007); Ribeiro *et al.*(2007); Dias *et. al.*(2007))

5.1.12 Componentes necessários para se implantar uma usina com aproveitamento energético do biogás

Para que se possa ter o aproveitamento energético do biogás em um aterro sanitário, alguns componentes básicos são necessários para se implantar uma usina, como é apresentado pela CETESB (2006):

- Flare: é utilizado na combustão dos gases que não forem aproveitados para a geração de energia elétrica;
- Gasômetro: Tem a função de armazenar e regularizar a vazão de gás, em que o armazenamento permite eventuais manutenções eventuais dos equipamentos de geração

de energia que possam surgir; bem como a regularização, que permite à usina operar com uma geração energética o mais constante possível;

- Compressor: Serve para a coleta do gás (So caso de um sistema ativo de coleta) e bombeamento do gás pela tubulação de coleta;
- Tubulação: para coleta e transporte do biogás do aterro a usina;
- Drenos: São utilizados para coletar o gás. São geralmente separados entre si por distâncias de 50[m]. O número de drenos pode ser calculado pela equação 5.1, onde A_A é a área do aterro e r = raio de abrangência do aterro, geralmente igual a 25 m.
- Unidades de tratamento do biogás: Serve para remoção de impurezas como H_2S , H_2O , e CO_2 e ampliação do teor de metano (CH_4) do biogás, o que eleva o poder calorífico do mesmo e diminui os riscos de problemas em equipamentos da usina.

$$N_D = \frac{A_A}{\pi r^2} \quad \text{Eq. 5.1}$$

A figura 5.9 apresenta um esquema de uma usina completa de aproveitamento energético em um aterro sanitário.

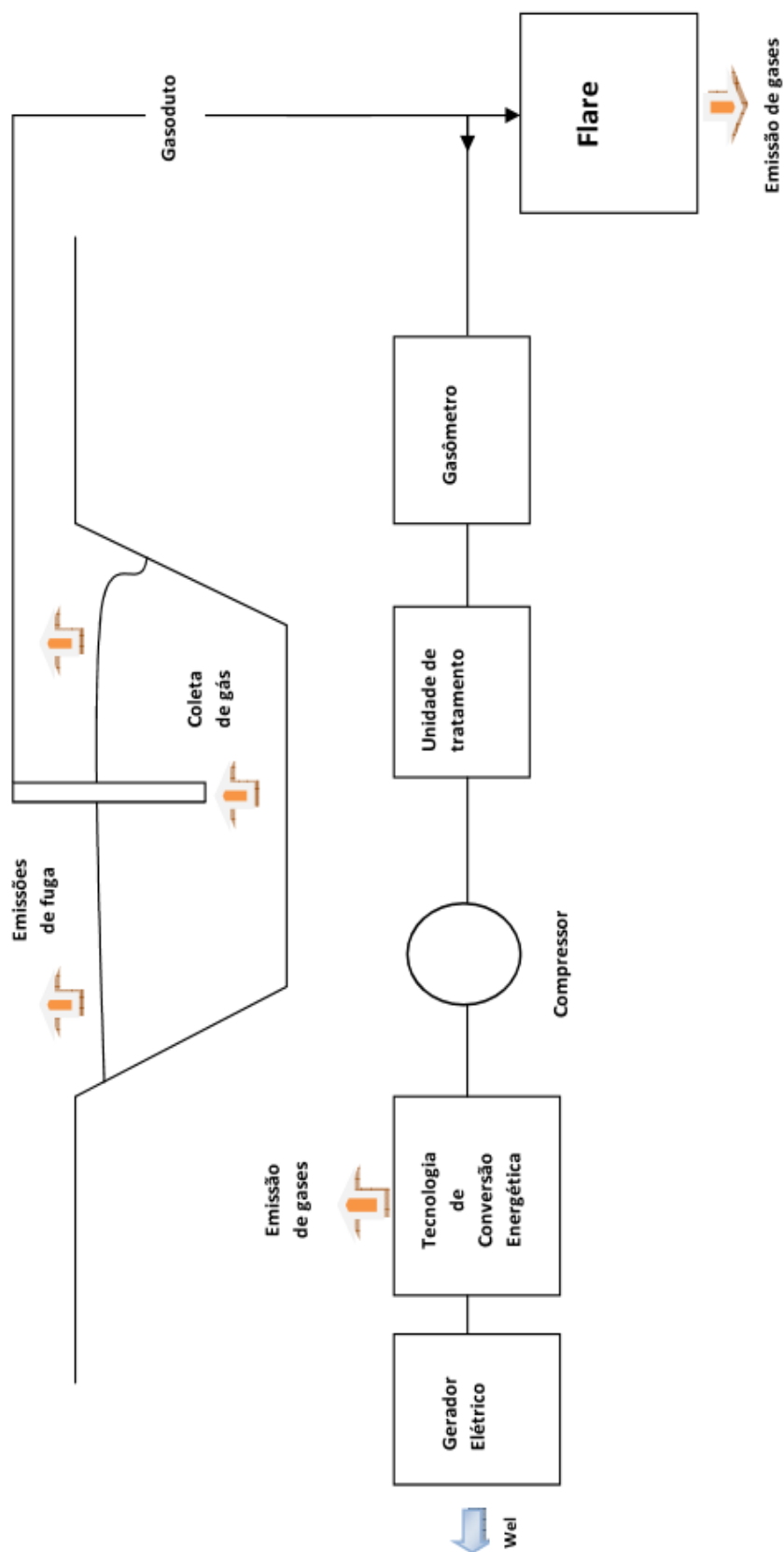


Figura 5.9: Esquema representativo de uma usina de aproveitamento energético em um aterro sanitário (SANTOS,2015).

5.2 Resultados da análise do aproveitamento energético do gás de aterro sanitário (biogás)

5.2.1 Aterro Sanitário de Itajubá- CIMASAS

Para determinar a composição gravimétrica do aterro sanitário de Itajubá- CIMASAS, ou seja, um gráfico que contenha informações dos resíduos que são depositados no aterro, alguns aspectos foram considerados, como:

- As informações dos quarteamentos realizados em cada município, resultando nas composições gravimétricas dos mesmos;
- A quantidade de RS que cada município depositou no aterro sanitário no ano de 2012 (CIMASAS, 2012);
- Média ponderada dos resíduos entre os municípios considerando, contudo, o peso relacionado à quantidade de resíduos:
 - Quantidade de resíduos CIMASAS 2012_____100%
 - Quantidade de resíduos municipal 2012_____ **a** %
 - Número de municípios 6_____100%
 - Peso do município **b**_____ a%
 - Quantidade de cada resíduo no consórcio: $\Sigma(\text{resíduo} \times \text{Peso})$ de cada município/6

O resultado é apresentado na figura 5.10.

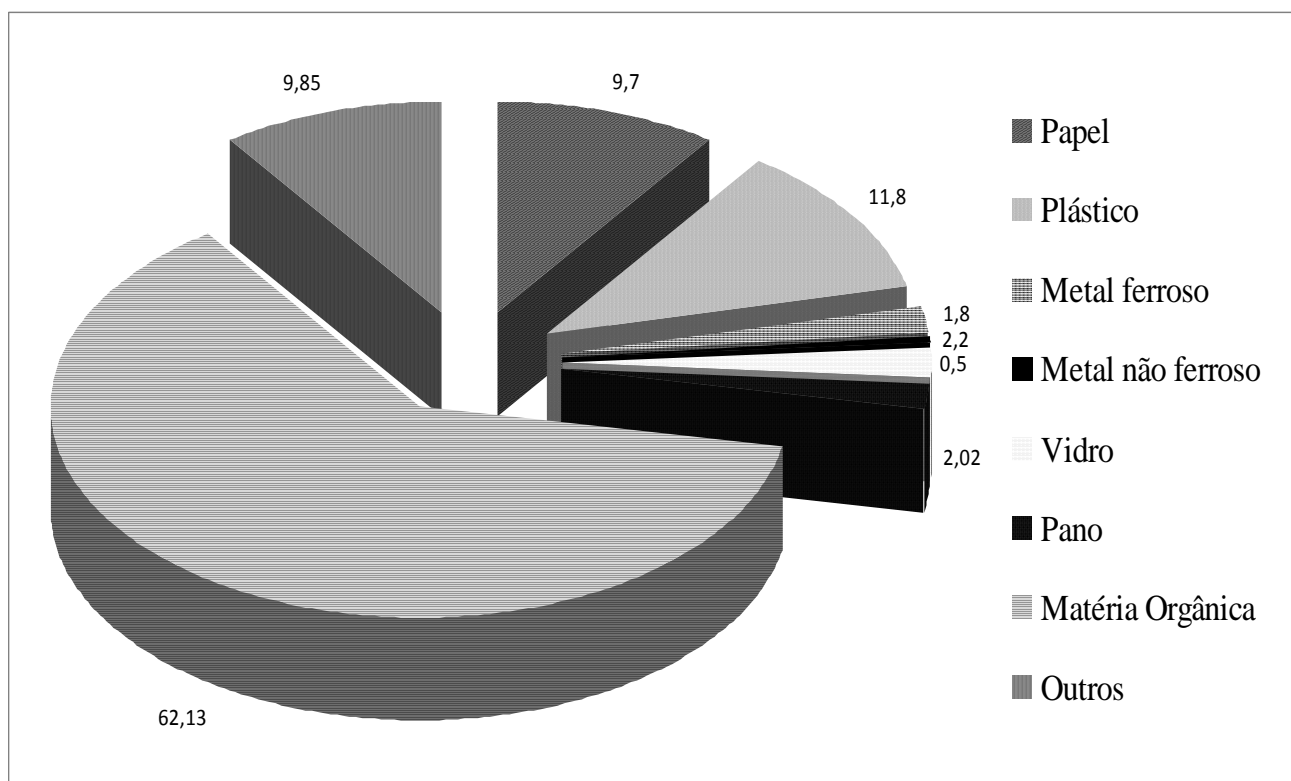


Figura 5.10: Resultado da caracterização dos RSU comerciais e domiciliares do Aterro (2012)

5.2.2 Projeção populacional do CIMASAS

Para realizar a estimativa da geração de metano ao longo dos anos no aterro sanitário, é necessário que se tenha uma estimativa populacional dos municípios do CIMASAS, uma vez que o aterro iniciou suas atividades em 2010, e com vida útil de aproximadamente 20 anos. Os dados para se realizar essa projeção populacional foram retirados dos censos demográficos de 2010. Silva (2012), em sua pesquisa sobre o consórcio CIMASAS fez a estimativa populacional do CIMASAS, apresentando o resultado para um intervalo de tempo de vinte anos para cada município do consórcio. A tabela 5.2 apresenta os valores obtidos pelo autor (*op.cit.*).

Tabela 5.2: Projeção populacional para os municípios do CIMASAS nos anos de 2010 a 2029.

Anos	Wenceslau Braz	São José do Alegre	Piranguinho	Piranguçu	Itajubá	Delfim Moreira	Total
2010	2.553	3.996	8.016	5.209	90.679	7.971	118.424
2011	2.551	4.011	8.033	5.224	91.268	7.967	119.054
2012	2.549	4.026	8.046	5.238	91.846	7.963	119.669
2013	2.548	4.040	8.057	5.250	92.413	7.960	120.269
2014	2.547	4.053	8.066	5.262	92.970	7.957	120.855
2015	2.546	4.066	8.074	5.273	93.516	7.954	121.428
2016	2.545	4.079	8.080	5.283	94.052	7.951	121.989
2017	2.544	4.091	8.085	5.292	94.578	7.948	122.538
2018	2.543	4.102	8.089	5.301	95.094	7.946	123.075
2019	2.542	4.113	8.092	5.309	95.601	7.944	123.600
2020	2.542	4.123	8.094	5.316	96.098	7.942	124.115
2021	2.541	4.133	8.097	5.323	96.586	7.940	124.619
2022	2.541	4.143	8.098	5.329	97.065	7.938	125.113
2023	2.541	4.152	8.100	5.335	97.534	7.936	125.598
2024	2.540	4.161	8.101	5.340	97.995	7.935	126.072
2025	2.540	4.169	8.102	5.345	98.448	7.933	126.537
2026	2.540	4.177	8.103	5.350	98.891	7.932	126.993
2027	2.539	4.185	8.103	5.354	99.327	7.931	127.439
2028	2.539	4.193	8.104	5.358	99.754	7.929	127.877
2029	2.539	4.200	8.104	5.361	100.174	7.928	128.307

(SILVA, 2012)

5.2.3 Estimativa de geração de RSU no CIMASAS

A partir do número de habitantes dos municípios integrantes do consórcio para o ano de 2010 (IBGE, 2010), assim como a quantidade de resíduos gerados no mesmo período (CIMASAS, 2010), pode-se calcular a taxa de geração de resíduo per capita para cada município do CIMASAS, considerando, contudo, a quantidade de resíduos que vai para o aterro sanitário, conforme apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Geração de RSU per capita do CIMASAS ano de 2010

Municípios do CIMASAS	Geração de RSU/dia (kg)	População (habitantes)	Geração RSU per capita (kg/hab/dia)
Itajubá	47325,59	90.658	0,52
Piranguinho	2650,08	8.016	0,33
Piranguçu	1244,19	5.217	0,24
São José do Alegre	1281,04	3.996	0,32
Wenceslau Bras	658,85	2.553	0,26
Delfim Moreira	1721,56	7.971	0,22

Adaptado do IBGE (2010), CIMASAS (2010)

Para se estimar a quantidade de resíduos que o aterro sanitário irá receber ao longo de sua vida útil, deve-se considerar a quantidade de resíduos per capita por dia por município, bem como a população estimada e o percentual de resíduos aterrados. Sendo assim, utiliza-se a equação 5.2.

$$P_{d(A)} = \left(\frac{Pop_i * p * R}{1000} \right) \quad \text{Eq. 5.2}$$

Onde:

- $P_{d(A)}$ = produção diária média de RSU (t./dia);
- Pop_i = População no ano considerado;
- p = produção per capita (kg/hab./dia);
- R = percentual de resíduos aterrados (%) (neste caso, admitiu-se que 100% dos resíduos coletados são dispostos no aterro sanitário).

A partir da equação 5.2, que calcula a produção diária média de RSU em toneladas por dia, pode-se gerar os gráficos da quantidade de RSU/dia gerados no período de atividade do aterro por cada um dos municípios consorciados, e da quantidade de RSU/dia gerados no período de atividade do aterro pelo consórcio todo, conforme apresentado nas Figuras 5.11 e Figura 5.12.

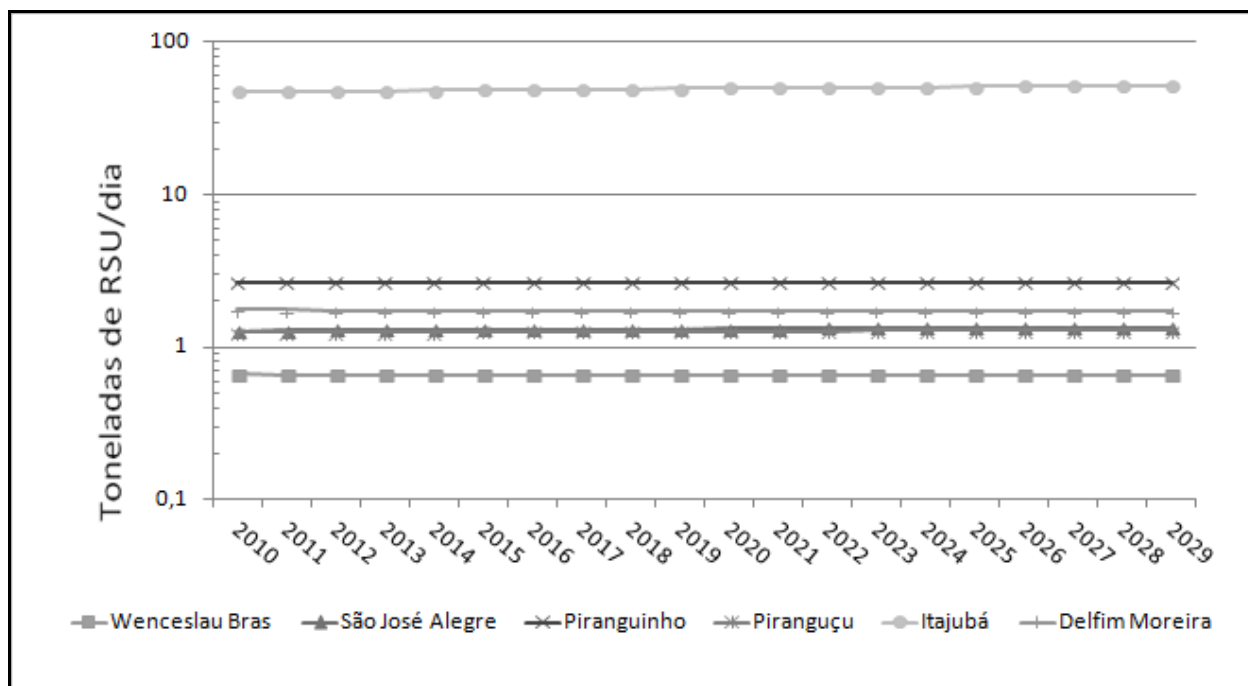


Figura 5.11: Geração de RSU por município por dia

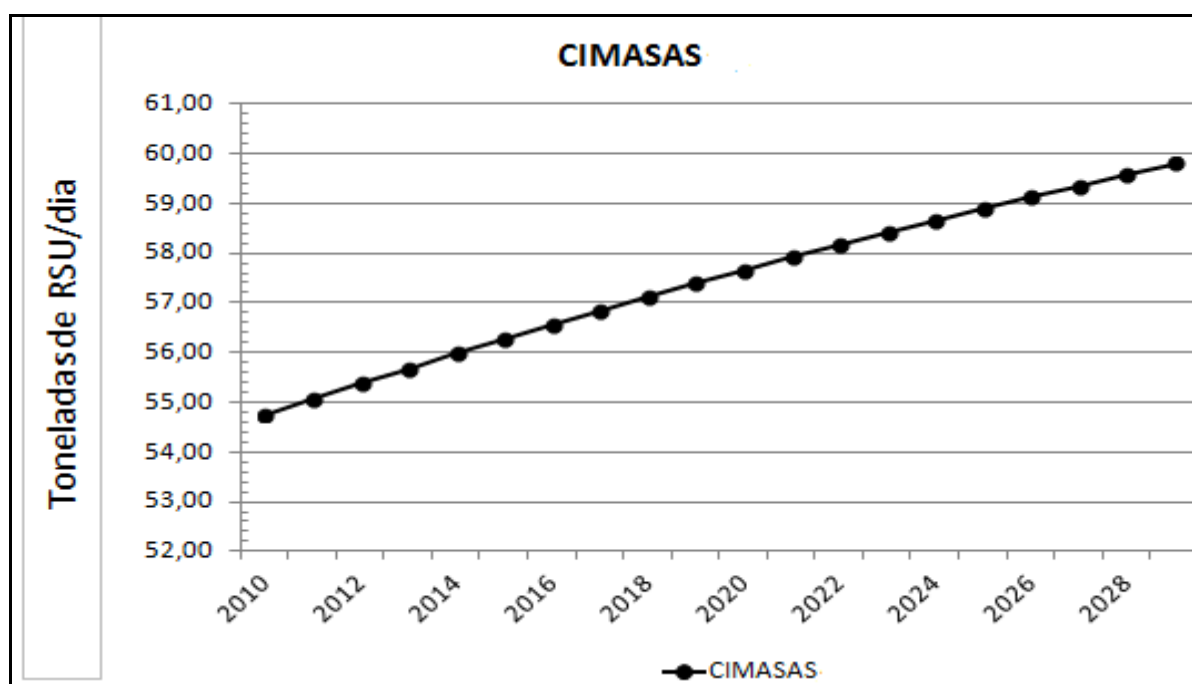


Figura 5.12: Geração de RSU total do CIMASAS por dia

Ao longo de vinte anos, o CIMASAS irá gerar em média, cerca de 57 toneladas de RSU/dia, podendo ser considerado um aterro de médio porte. Uma vez que a coleta do consócio atenda à toda a região do consócio, o aterro de Itajubá deverá receber mais de 400.000 toneladas de RSU em vinte anos.

5.2.4 Estimativa de geração de biogás no CIMASAS

O modelo matemático mais utilizado, e aqui aplicado, é o recomendado e desenvolvido pelo IPCC (1996), no qual foi posteriormente atualizado em 2006 (IPCC,2006). Ele é conhecido como Scholl Canyon Model. Foi escolhido por ser o modelo mais aceito por agências de financiamento e instituições que apoiam este tipo de projeto, inclusive a EPA norte-americana, por ser relativamente simples e objetivo. Este modelo adota uma eficiência de coleta de gás de 75%. (BANCO MUNDIAL, 2004).

A partir dos dados obtidos da composição gravimétrica dos municípios do CIMASAS formando um único gráfico, da estimativa populacional e da estimativa de geração de resíduos no CIMASAS, calculou-se através da metodologia escolhida a estimativa teórica da produção de gás metano, utilizando um suplemento para Excel sobre Aterros Sanitários, desenvolvido por Leme (2010). Neste software, a partir de informações sobre a composição e a quantidade do RSU, possibilita-se estimar o potencial energético do RSU, realizando balanços de acordo com as informações fornecidas pelo usuário. Neste caso, considerou-se também a temperatura na zona anaeróbia, 55 °C, encontrada na literatura (CASSINE, 2003). Para calcular a curva de geração de metano do aterro, foi feito o somatório dos resultados das equações 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 da Metodologia do IPCC, para cada ano do aterro, utilizando o software como é apresentado na figura 5.13.

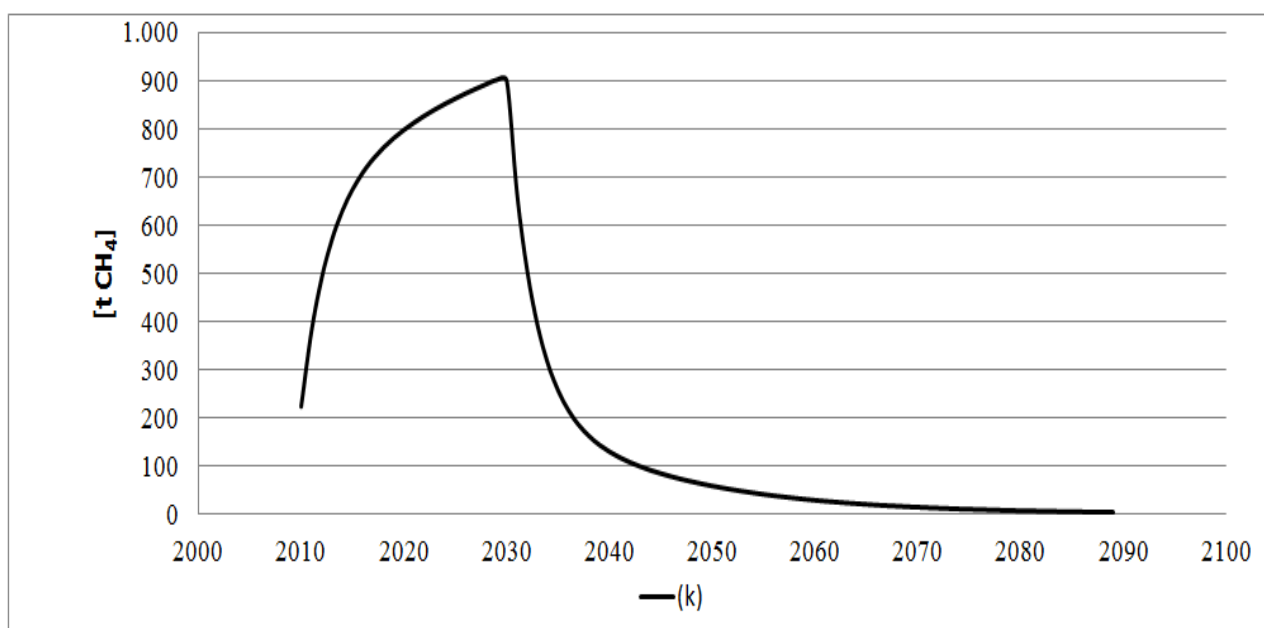


Figura 5.13: Curva de Geração de metano do CIMASAS (t de CH₄/ano).

5.2.5 Aproveitamento Energético do Biogás

O motor de combustão interna é uma tecnologia de conversão muito utilizada em aplicações com gás de aterro sanitário. A razão para tal uso, é o baixo custo comparado à outras tecnologias, a alta eficiência e dimensões do motor. Esses motores são relativamente eficientes na conversão de gás de aterro em eletricidade, e são capazes de alcançar eficiências na faixa de, . 25 a 35 %.(EPA,1996)

A curva de potência instalada foi construída respeitando-se os limites da curva de potência disponível. Foi considerado o uso do módulo gerador Caterpillar G3306, de 143 kW e de acordo com o catálogo do fabricante (CATERPILLAR,2014). Foi adaptado para esta planta, a aplicação de dois módulos geradores de energia, , uma vez que a geração de biogás para este aterro sanitário não é alta, a fim de obter o melhor aproveitamento possível da potência disponível. O cronograma de instalação e desinstalação dos módulos é mostrado na Tabela 5.4,. E a curva de potência disponível, é apresentada na figura 5.14.

Tabela 5.4: Cronograma de funcionamento dos módulos de geração de energia no aterro de Itajubá

Módulos Geradores	Potência (kW)	Início da Operação	Fim da Operação
Módulo 1	143	2011	2030
Módulo 2	143	2018	2033

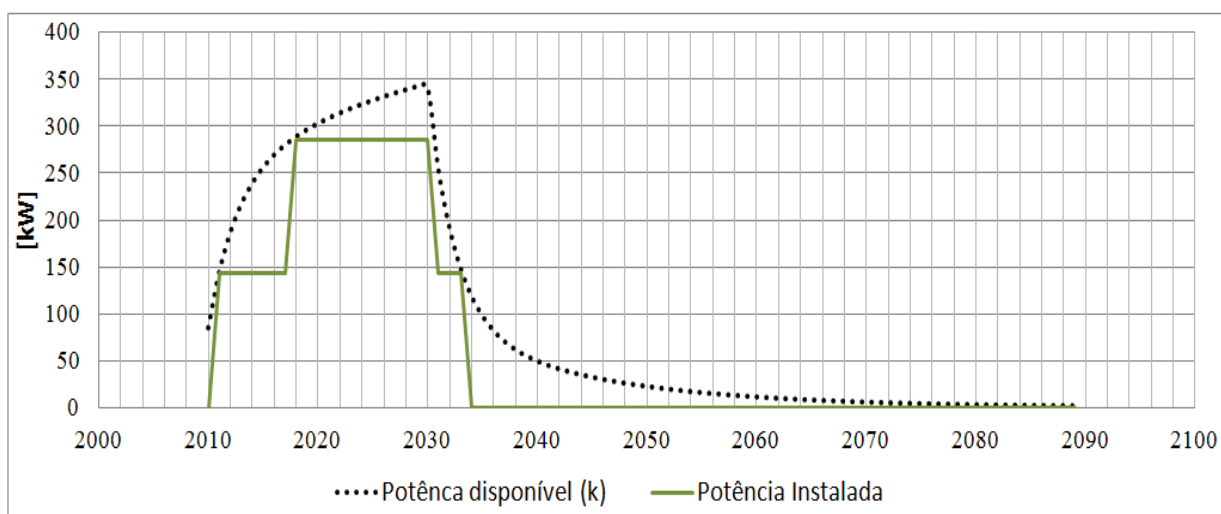


Figura 5.14: Curvas de potência disponível e instalada [kW/ano].

Na figura 5.14 e tabela 5.4, verifica-se a potência disponível e instalada varia ao longo dos anos, uma vez que a produção de biogás não é constante e sofre variação com o passar do tempo. Desta forma a tabela 5.5, apresenta a variação das potências.

Tabela 5.5: Variação da potência disponível e instalada utilizando o biogás

Ano de deposição de resíduos	Potência disponível (kW)	Potência Instalada (kW)
2010	85	0
2011	144	143
2012	186	143
2013	217	143
2014	239	143
2015	256	143
2016	270	143
2017	280	143
2018	289	286
2019	297	286
2020	303	286
2021	309	286
2022	314	286
2023	319	286
2024	324	286
2025	328	286
2026	332	286
2027	336	286
2028	339	286
2029	343	286
2030	342	286

5.2.6 Tecnologia escolhida para utilização do biogás

A tecnologia escolhida para a conversão do biogás de aterro foi o motor de combustão interna (MCI). Esta tecnologia é a mais empregada para a conversão de energia elétrica a partir do biogás de aterro sanitário devido ao maior rendimento elétrico e menor custo quando comparado às outras tecnologias (ICLEI, 2009). As potências economicamente viáveis variam de 1 e 3 MW, são compactos e fáceis de transportar, sendo sua principal desvantagem, as altas quantidades de NO_x e CO gerados quando comparadas com outras tecnologias (BOVE e LUNGHI, 2006). A Tabela 5.6 mostra a eficiência, consumo e emissões de um MCI da Caterpillar 3516 SITA, comparados a outras tecnologias.

Tabela 5.6: Características de um M C I comparados a outras tecnologias

Sistema	Eficiência (%)	Consumo de combustível (KJ/kWh)
Motor de Combustão Interna	33	10972
Turbina a Gás	28	12872
Ciclo Orgânico Rankine	18	19202

Adaptada de BOVE e LUNGHI, 2006.

Na tabela 5.6, pode-se observar que a eficiência de um MCI é bem maior que as outras tecnologias, além de utilizar de um consumo de combustível mais baixo.

5.2.7 Avaliação do potencial do biogás de aterro sanitário

O volume de biogás produzido no aterro sanitário não é constante. Após os resíduos serem depositados, o biogás levará anos sendo produzido, mesmo que seu volume diminua com o tempo. No caso deste trabalho realizou-se uma estimativa da produção do biogás para um período de vinte anos de deposição de resíduos, embora a geração deste gás continue sendo produzida ao longo de muitos anos posteriores. A partir do software utilizado, obteve-se uma média de quanto de biogás deve ser produzido no aterro sanitário, em vinte anos.

Da mesma forma, pode-se também efetuar através do software, uma média da energia média produzida, consumida, líquida e a e energia média produzida por toneladas de resíduos, nestes vinte anos. Os resultados podem ser verificados na tabela 5.7.

Tabela 5.7: Média da geração de metano e energia produzida no aterro para um período de vinte anos

(Média) Variação para um período de vinte anos				
Emissões de metano (t)	Energia Produzida (kWh)	Energia Consumida (kWh)	Energia elétrica Disponível (kWh)	kWh de Energia / Toneladas de resíduo
735	1.798.000	41.000	1.757.000	85,77

Esses resultados encontrados permite fazer uma análise, de quanto essa estimativa de energia produzida no aterro, poderia abastecer algum município do CIMASAS e por quanto tempo. Desta forma, realizou-se contato com a CEMIG- Companhia Energética de Minas Gerais, e solicitou-se o consumo mensal (kWh) para cada cidade do CIMASAS, durante um ano. Desta forma apresenta-se na tabela 5.8 o consumo destas cidades.

Tabela 5.8: Consumo de energia em kWh do município por mês durante um ano.

Energia Consumida pelas cidades do CIMASAS em kWh						
Mês	Delfim Moreira	Itajubá	Piranguçu	Piranguinho	São José do Alegre	Wenceslau Braz
NOV 2012	89.650	12.415.873	60.943	96.228	49.950	36.613
DEZ 2012	83.705	12.233.624	56.591	88.653	162.064	30.558
JAN 2013	86.212	9.573.501	55.299	83.589	47.002	32.803
FEV 2013	392.516	15.451.836	268.485	583.976	155.413	83.427
MAR 2013	459.266	18.030.564	318.155	688.012	275.355	172.067
ABR 2013	520.366	18.531.290	346.283	602.325	322.805	176.868
MAI 2013	571.846	19.469.273	393.725	685.437	295.169	186.994
JUN 2013	495.088	18.904.312	379.205	681.256	292.930	185.196
JUL 2013	504.930	18.196.114	370.409	693.764	301.698	172.774
AGO 2013	548.796	19.273.923	398.771	696.622	318.851	194.926
SET 2013	511.240	19.273.589	378.127	703.419	302.699	184.637
OUT 2013	536.859	18.724.945	412.647	716.306	299.467	184.978
NOV 2013	536.406	20.033.278	420.656	709.647	336.022	189.104

(CEMIG, 2013)

Tabela 5.9: Tempo de abastecimento de energia em kWh de cada município durante um ano.

Tempo de consumo de energia para as cidades do CIMASAS						
Média da energia fornecida pela central/ até os primeiros sete anos (kWh)				971.710		
Média da energia fornecida pela central/ após os primeiros sete anos (kWh)				2.240.770		
Municípios	Wenceslau Bras	São José do Alegre	Piranguçu	Piranguinho	Delfim Moreira	Itajubá
Consumo de energia Total anual (kWh) de cada município	1.830.945	3.159.425	3.859.296	7.029.234	5.336.880	220.112.122
Tempo de abastecimento dos municípios anual (%), (até os primeiros sete anos)	53%	31%	25%	14%	18%	0,44%
Tempo de abastecimento dos municípios anual (%), (após os primeiros sete anos)	122%	71%	58%	32%	42%	1,02%

Primeiramente, obteve-se o somatório da energia consumida por ano, em cada município. Depois, analisou-se a energia consumida pelos municípios com a média da energia líquida

fornecida no aterro por ano. Desta forma, a análise foi feita para dois intervalos de tempo, onde ocorre a variação da energia líquida fornecida, uma vez que há uma produção maior de biogás, a partir do oitavo ano, apresentado na tabela 5.9.

Assim, pode-se verificar que para a própria realidade do aterro sanitário de Itajubá, ou seja, a partir dos municípios que depositam resíduos no aterro; em vinte anos, o biogás gerado pode atender o consumo dos próprios municípios por um intervalo significativo de tempo; sendo que o de Wenceslau Bras, o biogás gerado pode atender até mais que 100% do seu consumo anual.

5.3 Análise da tecnologia da Gaseificação dos RSU

A partir dos dados levantados com o aterro sanitário escolhido para análise, realizando a estimativa da produção de biogás de aterro para o CIMASAS, obteve-se o potencial de geração de energia líquida de 36.904.000 kWh durante um período de vinte anos de deposição de RSU no aterro.

Desta forma, analisou-se para a mesma quantidade de resíduos sólidos a tecnologia da gaseificação. O modelo de gaseificador escolhido é o gaseificador de leito fixo, co-corrente ou *downdraft*, uma vez que ele oferece um gás mais puro, com baixo teor de alcatrão, podendo ser utilizado em acionamento de MCI.

5.3.1 Gaseificador escolhido para análise: Leito Fixo Co-corrente

Esse gaseificador foi escolhido para a análise por se tratar de um reator capaz de fornecer um gás com baixo teor de alcatrão, e sendo por essa razão, o tipo mais empregado para acionamentos de MCI, uma vez que ele reduz a necessidade de limpeza externa do gás. A justificativa para esse baixo valor de alcatrão, é o fato de os produtos da pirólise passarem pela zona de combustão, favorecendo o craqueamento térmico destes produtos presentes no gás (ANDRADE e LORA, 2013).

Considera-se uma viabilidade maior para este tipo de gaseificador, para potências de 100 kWe até 2MWe (LORA *et. al.*, 2004).

5.3.1.1 Eficiência do Gaseificador Co-corrente

A eficiência do gaseificador co-corrente em processos utilizando biomassa é avaliada utilizando a eficiência a frio do gás, podendo atingir faixas entre 68 a 72% (YOUNG, *et al.*,

2011; SIMONE, et. al.,2012).Para Martinez, *et al.*, 2012 a eficiência a frio de um gaseificador co-corrente pode variar entre 50% e 80%.

5.3.2 Quantidade de resíduos que formarão briquetes de RDF

A quantidade de resíduos a serem analisados neste processo de gaseificação, corresponde ao mesmo valor que foi depositado no aterro sanitário escolhido no estudo de caso, o aterro sanitário de Itajubá, CIMASAS. Sendo assim, a tabela 5.10 apresenta os valores anuais de deposição de resíduos sólidos, bem como o somatório deles em vinte anos, que é o tempo de vida útil do aterro.

Tabela 5.10: Quantidade de resíduos analisados no processo de gaseificação.

Ano de deposição de resíduos no aterro sanitário	Quantidade de resíduos depositados (t)	Quantidade de resíduos depositados em t/dia	Quantidade de resíduos depositados (t/h)
2010	19981,79	54,74	2,28
2011	20098,19	55,06	2,29
2012	20211,93	55,38	2,31
2013	20323,22	55,68	2,32
2014	20432,25	55,98	2,33
2015	20539,00	56,27	2,34
2016	20643,51	56,56	2,36
2017	20745,80	56,84	2,37
2018	20846,04	57,11	2,38
2019	20944,36	57,38	2,39
2020	21040,55	57,65	2,40
2021	21135,06	57,90	2,41
2022	21227,63	58,16	2,42
2023	21318,30	58,41	2,43
2024	21407,23	58,65	2,44
2025	21494,54	58,89	2,45
2026	21580,04	59,12	2,46
2027	21663,90	59,35	2,47
2028	21746,19	59,58	2,48
2029	21826,91	59,80	2,49
2030	20960,32	57,43	2,39

5.3.3 Combustível tratado (RDF- Refuse Derived Fuel)

Esse resíduo, para ser processado no gaseificador, passa por um processo de tratamento, não podendo ser alimentado diretamente no gaseificador, sendo formado o RDF, ou combustível derivado de resíduos.

A qualidade do RSU como combustível para um processo da gaseificação é importante para o projeto do gaseificador. O RSU tem particularidades como, umidade, quanto maior a umidade, menor será o poder calorífico do gás e irregularidades na granulometria dos RSU dificultando o processo de alimentação do gaseificador. Desta forma, a seleção dos resíduos passa por um peneiramento para remover a fração reciclável como, metais e vidros. O material é composto principalmente, por resíduos de comida, papel, alguns plásticos, resíduos de madeira e outros materiais. (LUZ, 2013).

Os principais consumidores de plásticos separados da massa de RSU são as empresas recicladoras, que reprocessam o material, como conduítes, sacos de lixo, baldes, cabides, garrafas de água sanitária, e acessórios para automóveis. Cerca de 21,7 % dos plásticos foram reciclados no Brasil em 2011, representando aproximadamente, 953 mil toneladas por ano. Em 2011, o país campeão na reciclagem de plásticos foi a Suécia (53%), seguida da Alemanha (33%), Suécia (33,2%), Bélgica (29,2%), Itália (23,5%), países que incineram a maior parte do plástico coletado seletivamente (CEMPRE, 2014).

Após a passagem do RSU pela etapa de triagem para separação de metais (ferrosos e não ferrosos) e inertes (vidros, entulhos), seguem para a próxima seção, onde o objetivo é produzir o RDF na forma de briquetes, passando pelas etapas da secagem, trituração e compactação do RSU, a fim de formar blocos de forma definida e de maior tamanho (LUZ, 2013; LESCANO et al., 2009; UFRJ/COPPE, 2004; GALLARDO, .et. al.2014; CAIXETA, 2005; KRIZAN, P.et al., 2011). Esse sistema pode ser verificado na figura 5.14.

Desta forma, os resíduos após passarem pelo processo de triagem e separação dos resíduos recicláveis, estão prontos para formar os briquetes. Contudo, uma parcela do total de resíduos analisados nessa pesquisa, que são a quantidade de resíduos depositados no aterro sanitário de Itajubá, para um período de vinte anos, terá uma parcela retirada, correspondente à porcentagem de metais, vidros, plásticos e entulhos que são direcionados a reciclagem.

Assim, o gaseificador será abastecido com os briquetes, que são uma maneira adequada de aproveitar os resíduos sólidos com um poder calorífico considerável e uma facilidade maior de manuseio e alimentação do gaseificador.

O Poder Calorífico dos RDF é a quantidade de energia interna contida no combustível por unidade de massa (kg), sendo liberada na queima completa do combustível, podendo variar de acordo com o teor de umidade de cada combustível. Logo, quanto mais alto for o poder calorífico, maior será o seu valor energético. A tabela 5.11 apresenta alguns valores do poder calorífico do RDF de acordo com alguns pesquisadores.

Tabela 5.11: Poder calorífico do RDF.

Poder Calorífico do RDF	
PCI – Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)	Fonte
12,6	Lescano <i>et. al.</i> , 2009.
13,2	Wagland, S. T. <i>et al.</i> , 2011.
>15,0	Pernes, 2008.

5.3.4 Cálculo da energia e da Potência disponível no gaseificador

Para calcular a potência produzida no gaseificador co-corrente , utiliza-se a equação 5.3.

$$P_{disp} = m \times PCI \times \eta \quad \text{Eq.5.3}$$

Onde:

P : Potência produzida no gaseificador MW

m: Massa de RDF em t/h.

PCI: Poder calorífico inferior do RDF em MJ/kg.

η : Eficiência do gaseificador %.

Para calcular a energia produzida no gaseificador co-corrent e utiliza-se a equação 5.4.

$$P = \frac{E}{\Delta T} \quad \text{Eq. 5.4}$$

Onde:

P= Potência disponível em MW

E= Energia disponível no gaseificador em MWh

ΔT = Tempo de funcionamento em hora

5.3.5 Tecnologia escolhida para utilização do gás da gaseificação

A tecnologia escolhida para a conversão do gás da gaseificação, também foi o MCI, devido a maior viabilidade econômica, quando comparado a outras tecnologias. E de acordo com Bove e Lunghi (2006), a eficiência pode chegar a 33%. Segundo Lora *et al.*(2004),os MCI são os mais indicados para usar junto com gaseificadores co-corrente, devido a baixa potência e menor teor de alcatrão no gás.

A figura 5.15 apresenta um esquema de gaseificação de briquetes de RSU, utilizando um MCI.

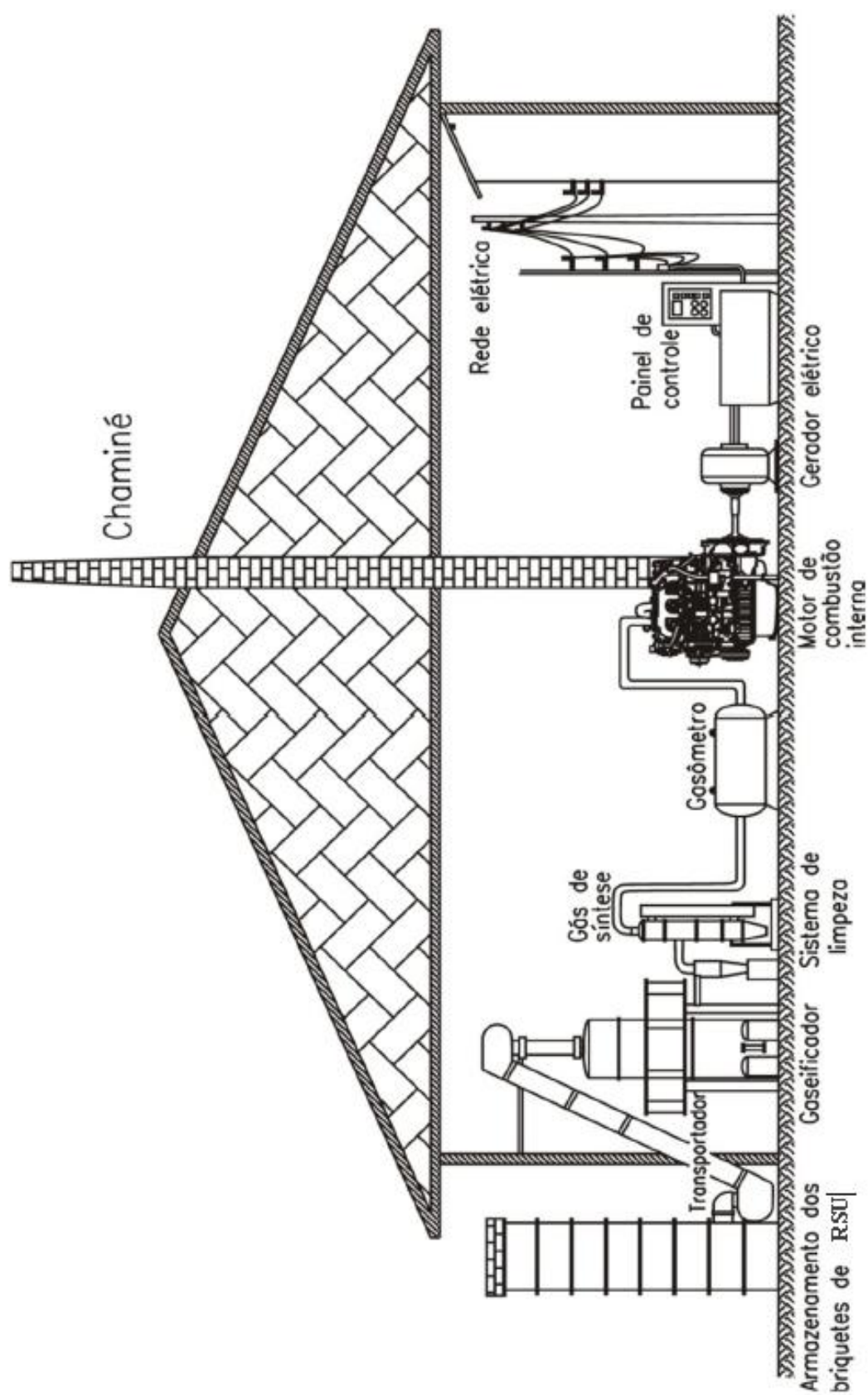


Figura 5.15: Esquema de gaseificação de briquetes de RSU utilizando MCI (LUZ, 2013).

5.3.6 Motor utilizado a partir do gás da gaseificação

O motor utilizado para gerar energia a partir do gás da gaseificação, é do grupo da Caterpillar, cujas especificações, encontram-se na tabela 5.12.

Tabela 5.12: Especificação do grupo gerador a gás escolhido para a gaseificação de RDF

Modelo do Motor	CG132-8
Classificação Contínua Máxima	400 kWe
Tipo de Combustível	Gás Natural, Biogás, Gás de Carvão
Frequência	50 a 60 Hz
Rotação	1.500 a 1.800 rpm

Fonte: (Caterpillar, 2015)

5.4 Resultados da análise da tecnologia da Gaseificação dos RSU

O resultado obtido para essa análise foi feita a partir de dados comparados aos dados do aterro sanitário de Itajubá; contudo, o procedimento de cálculo das tecnologias é diferente.

5.4.1 Massa de RDF utilizado no processo de gaseificação

Para que se tenha uma quantidade de resíduos que possam gerar energia, é necessário que antes passe por uma triagem, a fim de retirar os resíduos recicláveis. Nesta triagem são removidos, os metais, vidros, plásticos e inertes. Em relação aos plásticos, foram considerados somente 21,7% do total de plástico depositados no aterro sanitário; Sendo a porcentagem reciclada no Brasil em 2011, segundo o CEMPRE.

Desta forma, o total de massa analisado neste processo, foi o total de massa recebida no aterro sanitário em vinte anos dos municípios pertencentes ao CIMASAS, subtraindo-se a porcentagem respectiva a esses materiais retirados. A quantidade de materiais com possibilidade de reciclagem esta na tabela 5.13.

Tabela 5.13: Materiais retirados dos RDF.

Materiais retirados na triagem de geração de briquetes de RDF	
Materiais	Porcentagem (%)
Metal ferroso	1,8
Metal não ferroso	0,5
Vidro	2,2
Entulhos	7
Plástico	2,6
Total	14,1

Desta forma, a quantidade de resíduos que formarão briquetes de RDF serão menos 14,1% do total de resíduos acumulados no aterro em vinte anos.

5.4.2 Energia e Potência disponível utilizando o gaseificador

Para se calcular a potência disponível no gaseificador, bem como a potência elétrica disponível, considerou-se:

- Os valores disponíveis da quantidade de entrada de massa de RDF no gaseificador,
- O PCI do RDF,
- A eficiência do gaseificador,
- A eficiência do motogerador,
- As equações 5.3 e 5.4.

Tabela 5.14: Potência Disponível no gaseificador Co-corrente

Potência Disponível no gaseificador Co-corrente	
Massa de RDF	2,06 t/h
Massa de RDF	0,57 kg/s
PCI do RDF	14 MJ/kg
Eficiência do gaseificador	70 %
Eficiência do motogerador	28%
Fator de capacidade	0,9
Potência disponível do gaseificador	5,60 MW
Potência elétrica disponível	1,57 MW

Algumas observações a respeito dos valores apresentados na tabela 5.14:

- A massa de RDF apresentada é a média da massa de resíduos durante vinte anos e já se encontra com a porcentagem de resíduos recicláveis descontadas.
- Para o cálculo do PCI, foi adotado um valor médio, tendo como base os valores obtidos da literatura, conforme a tabela 5.11.
- Para a eficiência do gaseificador, foi adotada um valor médio dos valores obtidos da literatura, conforme o item 5.3.1.1.
- A eficiência do motogerador utilizado, foi adotada um valor médio dos valores obtidos da literatura e do catálogo do fabricante, conforme a tabelas 5.6 e 5.12.
- Todos os cálculos encontram-se no anexo A da presente dissertação.

Da mesma forma utilizada, a partir dos resultados da produção de biogás, analisando a variação de energia para vinte anos de deposição de resíduos, é possível também, calcular o valor médio da energia média produzida, energia disponível e a energia média produzida por toneladas de resíduos, em vinte anos, para o processo de gaseificação. Os resultados podem ser verificados

na tabela 5.15. Esta tabela vem contextualizar a média da energia total produzida em vinte anos de gaseificação de RSU, caso fosse possível este armazenamento.

Tabela 5.15: Análise da geração de energia para o processo de gaseificação

Variação de Energia anual		
Energia Produzida (kWh)	Energia elétrica Disponível (kWh)	kWh de Energia / toneladas de resíduo
44.150.400	12.377.880	590,54

6. Análise Econômica

A partir dos conteúdos apresentados anteriormente das considerações técnicas a respeito da utilização do biogás e da gaseificação dos RSU, faz-se necessário uma avaliação acerca da viabilidade econômica da utilização desse gás produzido a partir da gaseificação dos RSU em MCI. A metodologia econômica mais utilizada para se analisar a viabilidade dos investimentos, o fluxo de caixa e seus indicadores são: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Custo nivelado de energia (LCOE) e o pay back, também denominado Tempo de Recuperação de Capital (TRC).

6.1 Principais Indicadores Econômicos

Para realizar uma análise econômica dos processos envolvidos, foram utilizadas algumas ferramentas que auxiliaram a realização desta análise, sendo as principais a taxa de atratividade mínima, o VPL, a TIR, o payback e o custo nivelado de energia. Para isto, foi necessário montar um fluxo de caixa com os valores de entradas (receitas) e saídas (despesas), em um dado intervalo de tempo.

6.1.1 Taxa mínima de Atratividade (TMA):

Também conhecida como taxa de juros comparativa ou de desconto, essa taxa é na verdade, a taxa mínima de retorno que o investidor pode obter como rendimento de seu investimento (BRASIL, 2002).

6.1.2 Valor Presente Líquido (VPL):

De acordo com Brasil (2002), o critério do valor presente líquido (VPL) fornece informações a respeito de um investimento, podendo determinar o valor presente de futuros pagamentos já descontados a taxa de juros e o custo do investimento inicial, ou seja, é o cálculo de quanto os futuros pagamentos, somados a um custo inicial estariam valendo atualmente. Desta forma, se o VPL for maior que zero, significa saldo positivo para o investidor, nesse sentido o projeto pode ser aceito. Em contrapartida, se o VPL for menor que zero, significa que o investidor perderá para investir no projeto.

Assim:

$VPL > 0$: Aceita o projeto.

$VPL \leq 0$: Rejeita o projeto.

6.1.3 Taxa Interna de Retorno (TIR):

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa de juros que torna o valor presente das entradas, recebimentos, igual ao valor das saídas, pagamentos, previstas de caixa. A TIR é uma taxa de desconto que faz com que o VPL de um projeto seja igual à zero. Projetos com taxas de desconto (TMA) superiores a TIR devem ser rejeitados. Projetos cujos valores de taxa de desconto são inferiores aos valores de TIR devem ser aceitos (BRASIL, 2002):

Se $TIR > i$: Aceita o Projeto;

Se $TIR \leq i$: Rejeita o Projeto;

Para i = taxa de desconto

6.1.4 Tempo de Retorno (Payback):

O método payback mede o tempo necessário para se ter de volta o capital investido, considerando-se a mudança de valor do dinheiro no tempo (efeito do custo de capital). Seu valor fornece um indicativo do risco do investimento. Quanto maior é o payback de um investimento mais tempo deverá ser necessário para se obter o capital investido de volta, sendo portanto, maior o risco. Por outro lado, projetos de payback pequenos são menos arriscados, uma vez que se projeta um período menor de recuperação do capital investido (BRASIL, 2002).

6.1.5 Custo nivelado de energia

O Custo nivelado da eletricidade LCOE - Levelized Cost of Electricity (BRANKER *et al.*, 2011 *apud* SANTOS,2015), se refere à razão entre a somatória de custos transferidos ao ano inicial e a energia também descontada no tempo, definido a partir da equação 6.1.

$$LCOE = \sum_{t=0}^m \left[\frac{C_n}{(1+i)^n} \right] \left[\frac{E_n}{(1+i)^n} \right] \quad \text{Eq.6.1}$$

Onde:

E = energia produzida anualmente,

i = taxa de desconto,

m = vida útil do empreendimento,

Com = custo de operação e manutenção,

Cn = Custo a cada ano

n = ano.

6.1.6 Análise de Sensibilidade

Para realizar esta análise de sensibilidade, utiliza-se de cenários, para permitir uma comparação mais detalhada dos indicadores para um dado valor.

6.2 Parte I- Viabilidade da utilização do Biogás do Aterro Sanitário

Nesta etapa, a análise dos custos da utilização do biogás é muito importante, para se saber a viabilidade desse empreendimento. Para isso, foi levantado valores referentes a um processo de geração, tratamento e venda do biogás.

6.2.1 Custos de implantação de uma usina de aproveitamento energético de aterros sanitários

Para calcular os custos e receitas do processo de geração de energia a partir do biogás, foram considerados alguns valores:

➤ **Custos:**

Os custos relacionados a cada um dos equipamentos necessários ao funcionamento de uma usina podem ser conferidos na tabela 6.1

Tabela 6.1 Custos de equipamentos para aproveitamento energético dos aterros

Componente	Custo corrigido (2014)	Fonte
Flare	320.000 [R\$/Unidade]	CETESB (2006)
Gasômetro	145 [R\$/m ³]	CETESB (2006)
Compressor	804 [R\$/m ³ /hr]	CETESB (2006)
Gasoduto de transporte	402 [R\$/m]	CETESB (2006)
Comprimento da Tubulação	500 m	SANTOS (2015)
MCI	1600 [R\$/KW]	CETESB (2006)

Os valores obtidos pela CETESB (2006) já estão convertidos para 2014 por meio da Calculadora do cidadão do Banco Central do Brasil (2014)

O investimento foi calculado pela equação 6.3 (SANTOS, 2015).

$$I = C_{MCI} * P + C_{TUB} * L + C_{QMD} + C_{CMP} * Q_{hr} + C_{GSM} * Q_{arm} \quad \text{Eq.6.2}$$

Onde:

- C_{MCI} = custo unitário do motor de combustão interna,
- P = potência do motor,
- C_{TUB} = custo unitário da tubulação,
- L = comprimento da tubulação,
- C_{QMD} = custo do flare,
- C_{CMP} = custo unitário do compressor,
- Q_{hr} = vazão em m³/h,
- C_{GSM} = Custo do gasômetro,
- Q_{arm} = vazão de gás planejada a ser armazenada no gasômetro, igual a 10% da vazão mensal (vazão de 3 dias). Esta vazão foi escolhida devido ao fato de que 3 dias de armazenamento de gás já seria o suficiente para eventuais manutenções nos motores (SANTOS, 2015).

- Para a infraestrutura do projeto, adotou-se R\$ 250.000 para 400 m² (SANTOS, 2015).
- Taxa de juros de 12% a.a. (SANTOS, 2015).

➤ Receita

Considerou-se a tarifa de venda de energia igual a 212,75 [R\$/MWh] (valor obtido no quarto leilão de contratação de energia reserva de 2015 (A-3), a partir de biomassa (ANEEL,2015)

A partir dos dados obtidos, a viabilidade do processo apresentaram os seguintes resultados quanto ao seu Fluxo de Caixa, VPL, e da Análise de sensibilidade do VPL em relação a tarifas e as taxas de juros, LCOE, da TIR e do Payback.

O Fluxo de Caixa do empreendimento pode ser verificado na figura 6.1.

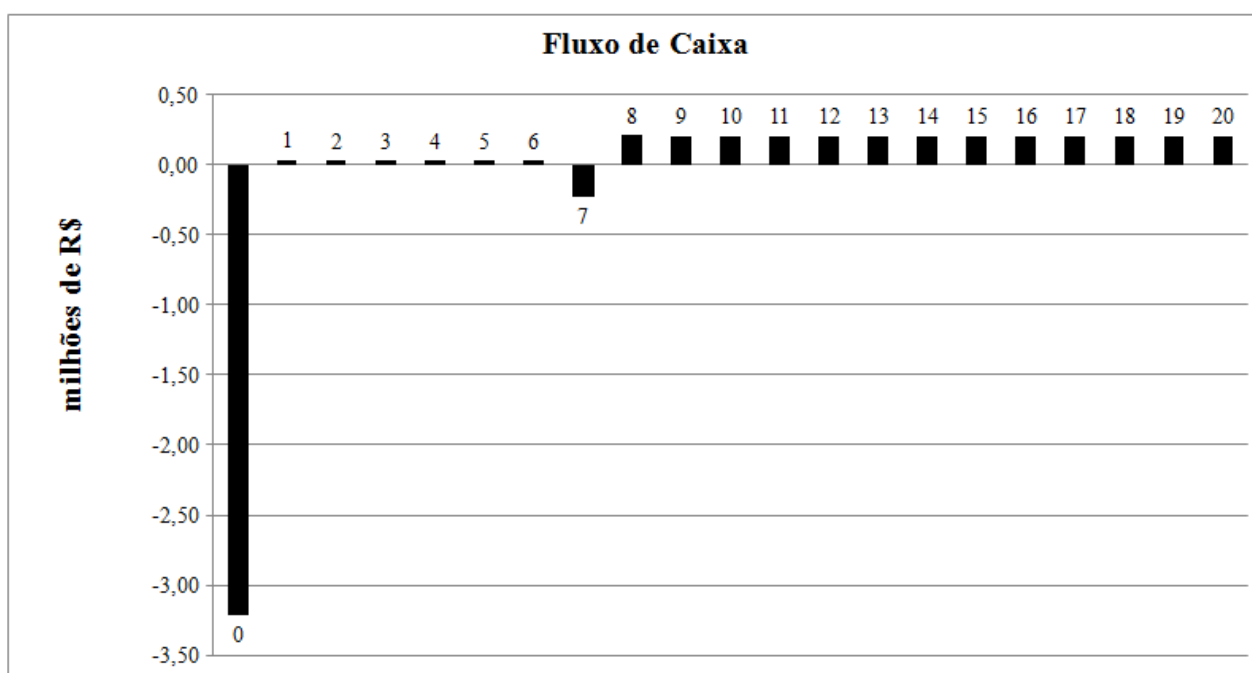


Figura 6.1: Fluxo de Caixa para o Biogás

Pela análise da figura 6.1, pode-se verificar que utilizando de dois grupos geradores de energia, a partir do biogás, o empreendimento neste caso não é viável, com uma receita muito menor do que o investimento.

Desta forma, fez-se também uma Análise de Sensibilidade Econômica do empreendimento, a fim de verificar o comportamento do VPL, quanto à variação das tarifas (T) e taxas de juros adotadas (i). Assim, foi feito dois cenários, o primeiro onde se varia a tarifa de

venda de energia, para um valor fixo de taxa de juros (C1) e o segundo onde se varia a taxa de juros e mantém fixo a tarifa de venda de energia (C2) respectivamente.

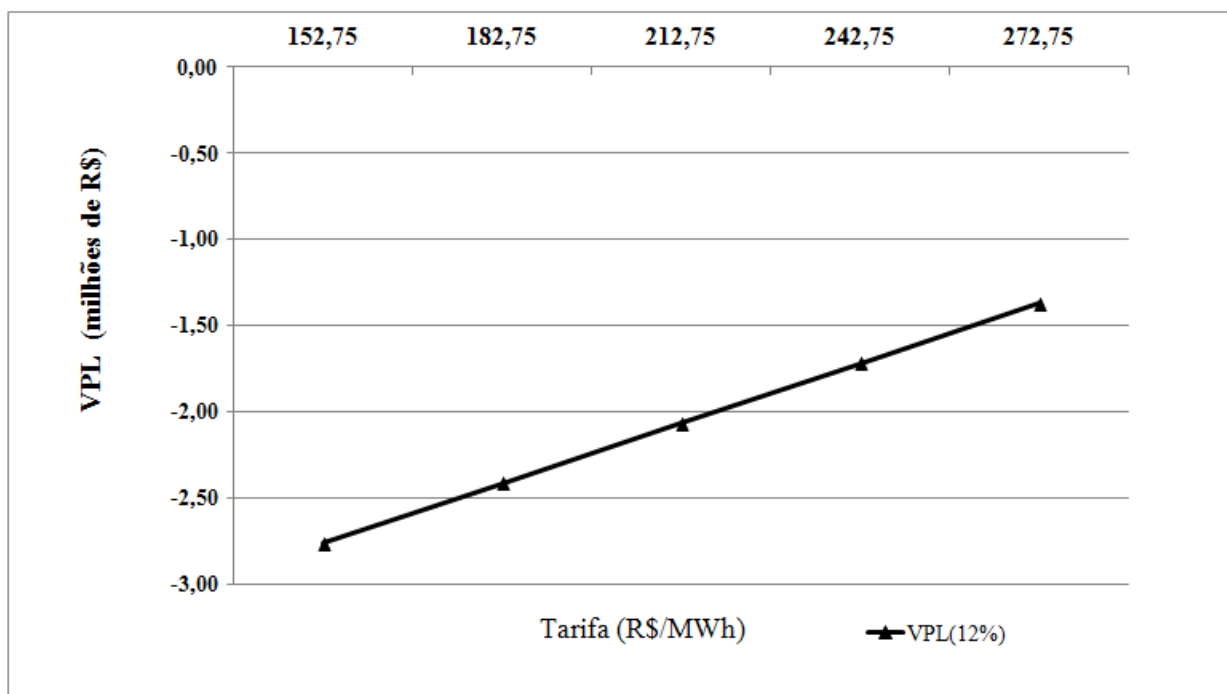


Figura 6.2: Cenário 1

Neste caso onde a variação ocorre nas tarifas (T), o VPL, apresenta um resultado negativo até para os valores mais altos das tarifas, demonstrando a inviabilidade do empreendimento.

Já o caso do cenário dois, onde se varia a taxa de juros e mantém fixa a venda da tarifa de energia, valor obtido no quarto leilão de 2015, também se demonstra a inviabilidade do empreendimento, com um valor de negativo.

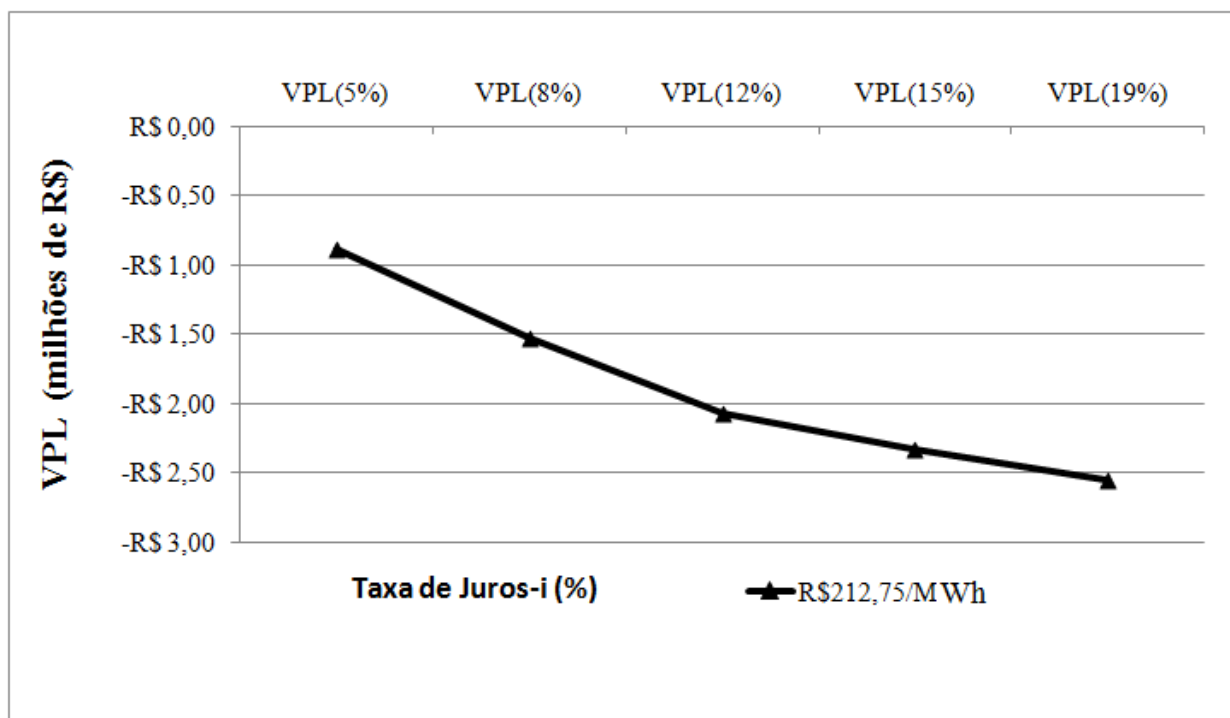


Figura 6.3: Cenário 2

Também se fez uma análise da determinação da TIR em função do VPL, conforme apresentado nas figuras 6.4 e 6.5.

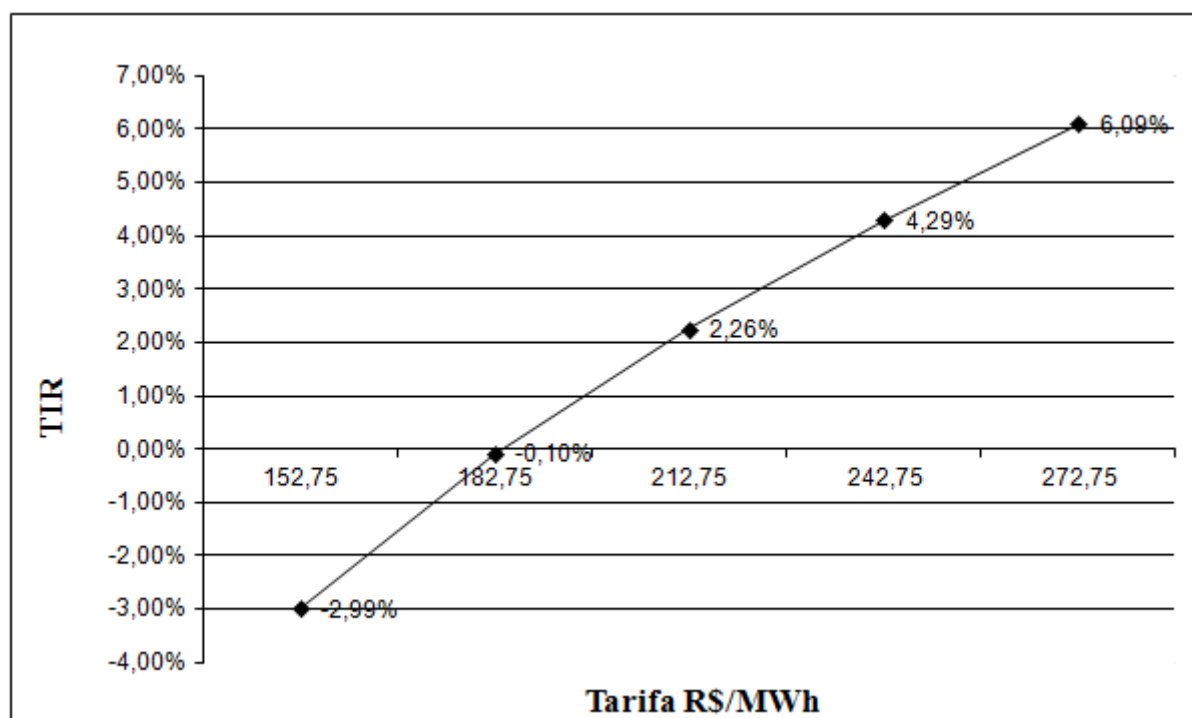


Figura 6.4: Variação da TIR em função das tarifas de energia

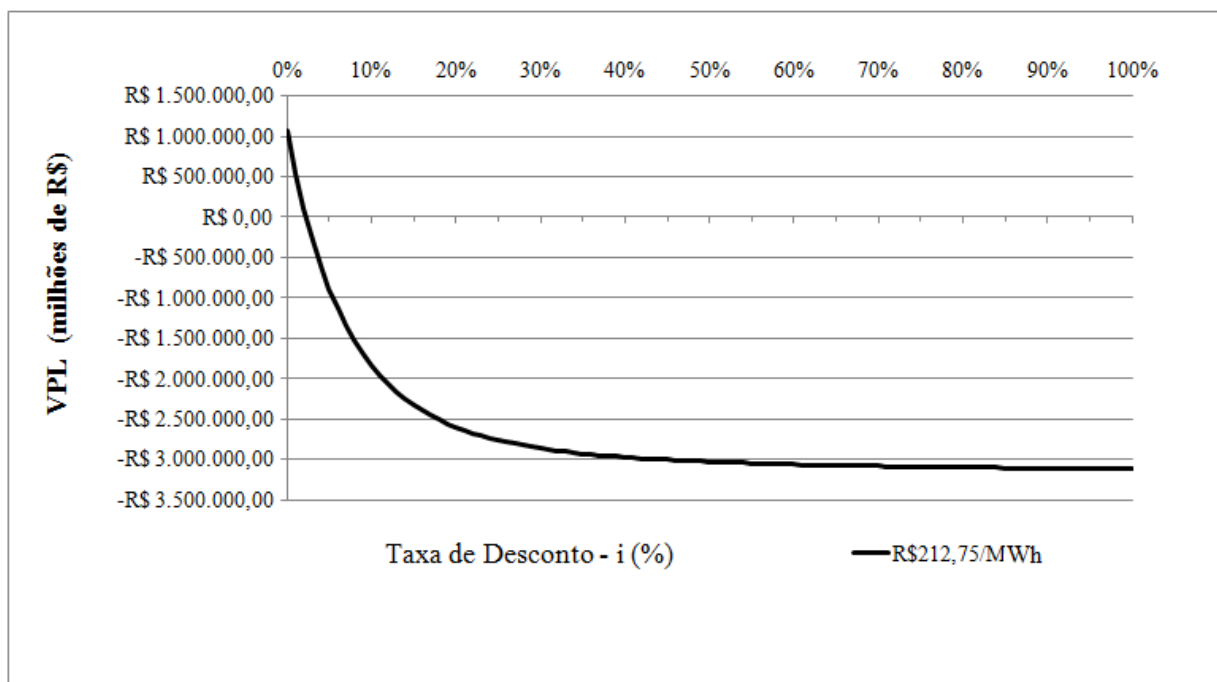


Figura 6.5: Variação do VPL em função da taxa de desconto (determinação da TIR)

A partir da TIR, o empreendimento não se torna viável para a taxa de 12% e tarifa de 212,75 R\$/MWh, uma vez que apresenta o valor do VPL negativo e não igual a zero. Outra análise foi feita em relação Ao custo de geração de energia nivelado (LCOE), apresentada na figura 6.6.

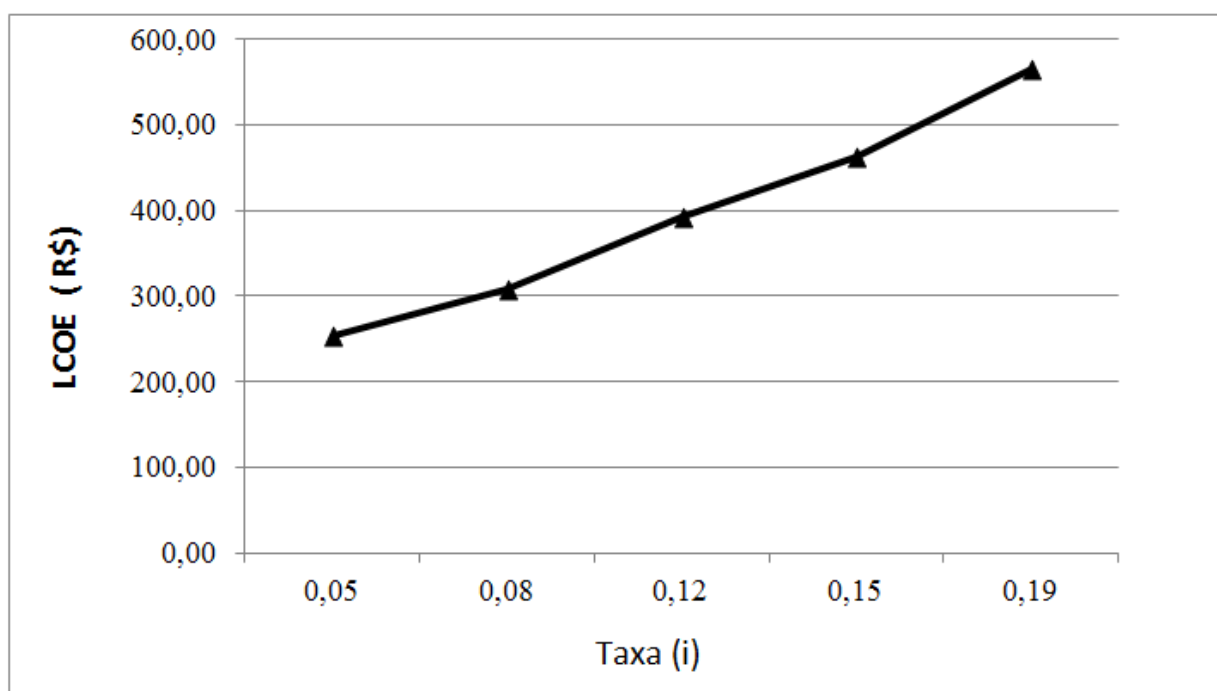


Figura 6.6: Determinação do custo de geração a partir de diferentes taxas de juros

A partir da figura 6.6, pode-se observar que o custo de geração de energia aumenta para valores de taxas de juros mais altas. Determinou-se também o tempo de retorno do capital, em função da taxa de desconto de 12% , apresentado na figura 6.7.

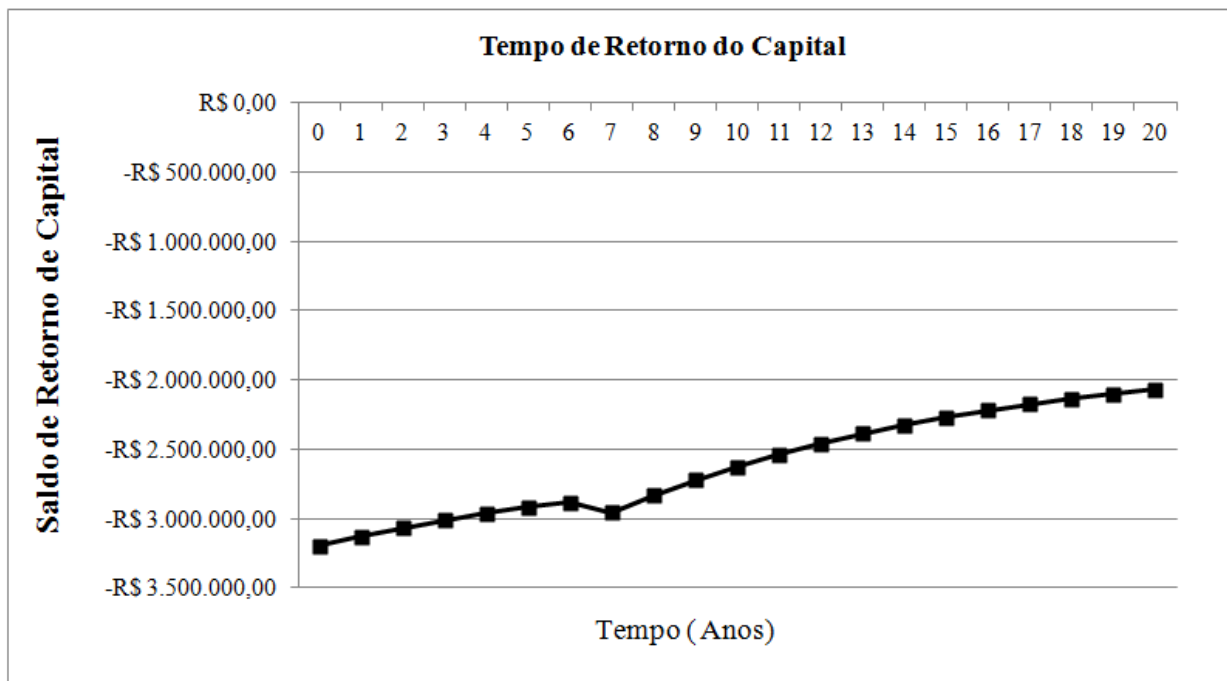


Figura 6.7: Determinação do Tempo de Retorno de Capital em função da taxa de desconto de 12%.

A partir da figura 6.7, pode-se verificar que o tempo de retorno de capital é muito longo, considerando o ano de investimento, desta forma, o projeto se mostra inviável.

No entanto, a prefeitura, tem projetos de ampliação do Consorcio dos municípios integrantes do CIMASAS. Caso isso realmente aconteça, a possibilidade de aproveitamento desse biogás gerado poderá ser viável, uma vez que, apresentará uma quantidade de resíduos maior do que a atual, conseqüentemente um volume maior de biogás.

De acordo com Santos (2015), Um estudo realizado por uma integrante do grupo de estudos em energias renováveis (GEER) do Instituto de Recursos Naturais da Universidade Federal de Itajubá, professora Regina Barros, a viabilidade econômica deste tipo de aproveitamento só é assegurada para cidades com mais de 200.000 habitantes contribuintes de resíduos.

6.3 Parte II- Viabilidade da utilização da Gaseificação do RSU

O período considerado para análise econômica da gaseificação de RSU, também foi de 20 anos. A análise foi realizada por meio dos indicadores VPL e TIR e análise de Sensibilidade. Foi elaborado um fluxo de caixa com todas as entradas e saídas. As entradas foram os rendimentos com a venda da eletricidade produzida e vendas dos materiais recicláveis. As despesas incluem os custos com os equipamentos e instalação e custos com operação e manutenção.

De acordo com a figura 6.8 a separação primária consiste na realização da triagem, sendo esta uma etapa muito importante, uma vez que permite a retirada dos resíduos que podem ser recicláveis, como os metais, vidros e plásticos. Estes materiais são separados de forma adequada, a fim de serem comercializados. Desta forma, buscaram-se os valores referentes a estes resíduos, em sua venda por tonelada.



Figura 6.8: Fluxograma para o tratamento do RSU por gaseificação. (LUZ, 2013).

6.3.1 Despesas do projeto

6.3.1.1 Implantação

Para se implantar uma usina de aproveitamento energético do gás obtido a partir da gaseificação do RSU, tem-se um custo inicial, que são os custos de implantação. Este custo foi estimado a partir dos custos dos principais equipamentos mostrados na Tabela 6.2 e dos custos de instalação e infraestrutura do projeto.

Tabela 6.2: Custos de equipamentos para implantação do projeto.

Custos dos Equipamentos		
Equipamento	Custo	Fonte
Separação primária de RSU	R\$ 700.000/2,1ton/h	LUZ (2013)
Tratamento mecânico (Briquetes)	R\$ 488.100/2 ton/h	LUZ (2013)
Gaseificador	R\$ 200.000 /100 kg/h	Dados de Projeto
Grupo Gerador	R\$ 1600 /kW	CETESB (2006)

6.3.1.2Custo de instalação

Para a instalação foi adotado um valor de 107% dos custos dos equipamentos (LUZ, 2013).

6.3.1.3 Operação e Manutenção (O & M)

Os custos de Operação e Manutenção (C.O) foram considerados 5% do Investimento Inicial.

6.3.1.4 Infraestrutura

Para a infraestrutura do projeto, adotou-se R\$ 250.000 para 400 m² (SANTOS, 2015).

6.3.2 Receitas do projeto

As receitas foram obtidas a partir da venda dos recicláveis e venda da eletricidade produzida (LUZ, 2013).

6.3.2.1 Venda de eletricidade

Considerou-se a tarifa de venda de energia igual a 212,75 [R\$/MWh] (valor obtido no quarto leilão de contratação de energia reserva de 2015 (A-3), a partir de biomassa (ANEEL,2015).

6.3.2.2 Taxa de juros

O valor da taxa de Juros adotada foi de 12% a.a (SANTOS, 2015).

6.3.2.3 Venda de recicláveis

Para o cálculo dos rendimentos dos recicláveis, foram utilizados os valores de Novembro/Dezembro de 2014 da CEMPRE (Compromisso Empresarial para Reciclagem), no qual os valores são especificados por estado. Assim, para o estado de Minas Gerais, tem-se:

- R\$ 1764,00/ton., para plásticos (considerando a média dos plásticos rígidos, PETs e filmes) ,
- R\$ 215,00/ton., para vidro,
- R\$ 250,00/ton.,para metais.

A partir dos dados obtidos da gaseificação dos briquetes de RSU, a viabilidade do processo apresentaram os seguintes resultados quanto ao seu fluxo de caixa, VPL, e da análise de sensibilidade do VPL em relação a tarifas e as taxas de Juros, da TIR e do Payback.

O fluxo de caixa da gaseificação esta apresentado na figura 6.9.

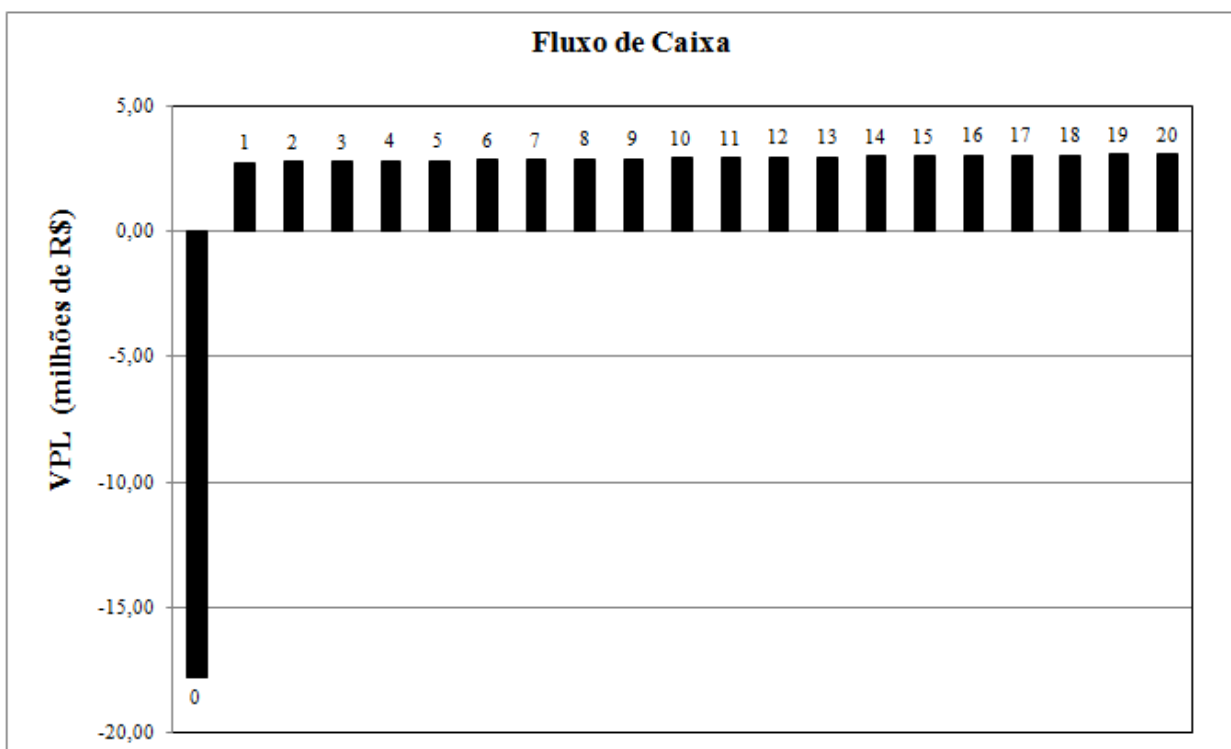


Figura 6.9: Fluxo de Caixa para a gaseificação

Pela análise da figura 6.9, pode-se verificar um valor positivo no fluxo de caixa.

Desta forma, fez-se também uma Análise de Sensibilidade Econômica do empreendimento, a fim de verificar o comportamento do VPL, quanto à variação das tarifas (T) e taxas de juros adotadas (i). Assim, também foi feito para a gaseificação dois cenários, o primeiro onde se varia a tarifa de venda de energia, para um valor fixo de taxa de juros (C1) e o segundo onde se varia a taxa de juros e mantém fixo a tarifa de venda de energia (C2), respectivamente.

Neste cenário um, a viabilidade do processo é verificada para quase todas as tarifas de venda de energia, com a taxa fixa de juros a 12 % a.a., compensando realizar o empreendimento, como apresentado na figura 6.10.

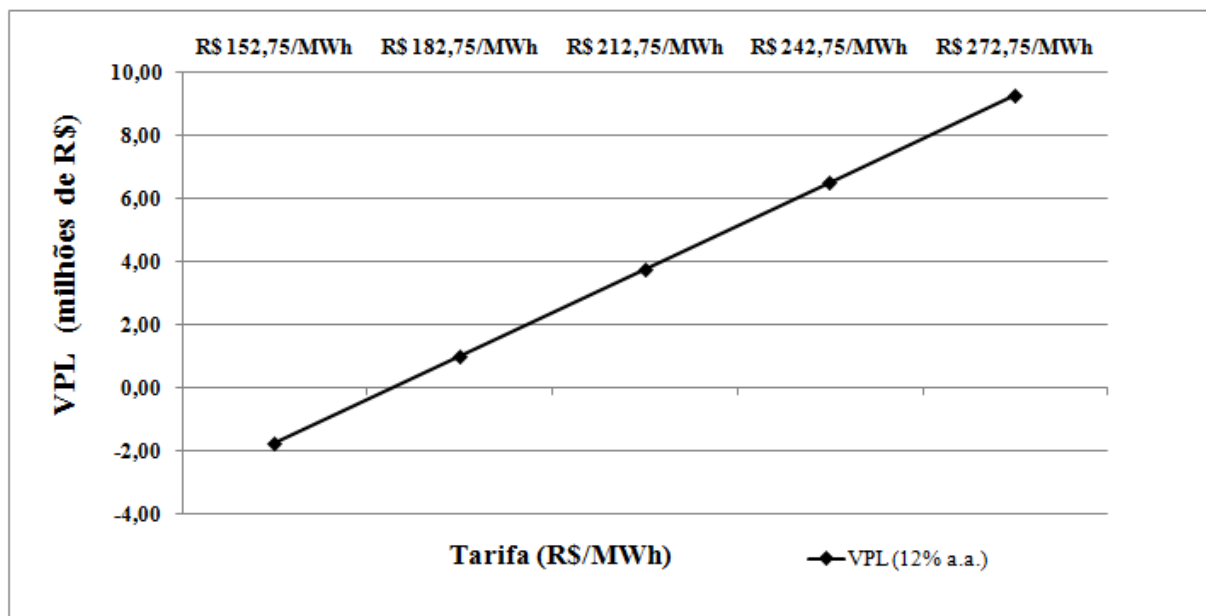


Figura 6.10: Cenário 1

Já no caso do cenário dois, onde a variação ocorre somente pela taxa de juros (i), e se fixa o valor da tarifa (T), o VPL, também apresenta um resultado positivo para quase todas as taxas de juros, demonstrando a viabilidade do empreendimento, até mesmo para o caso de uma taxa de juros muito alta, apresentado na figura 6.11.

Estes cenários podem ser claramente visualizados com a figura 6.12, onde há determinação do valor do VPL, para cada variação de tarifa de energia e de taxa de juros. Desta forma, pode-se observar que o valor do VPL só se torna negativo para algumas tarifas de energia, quando o valor da taxa de juros é o mais alto.

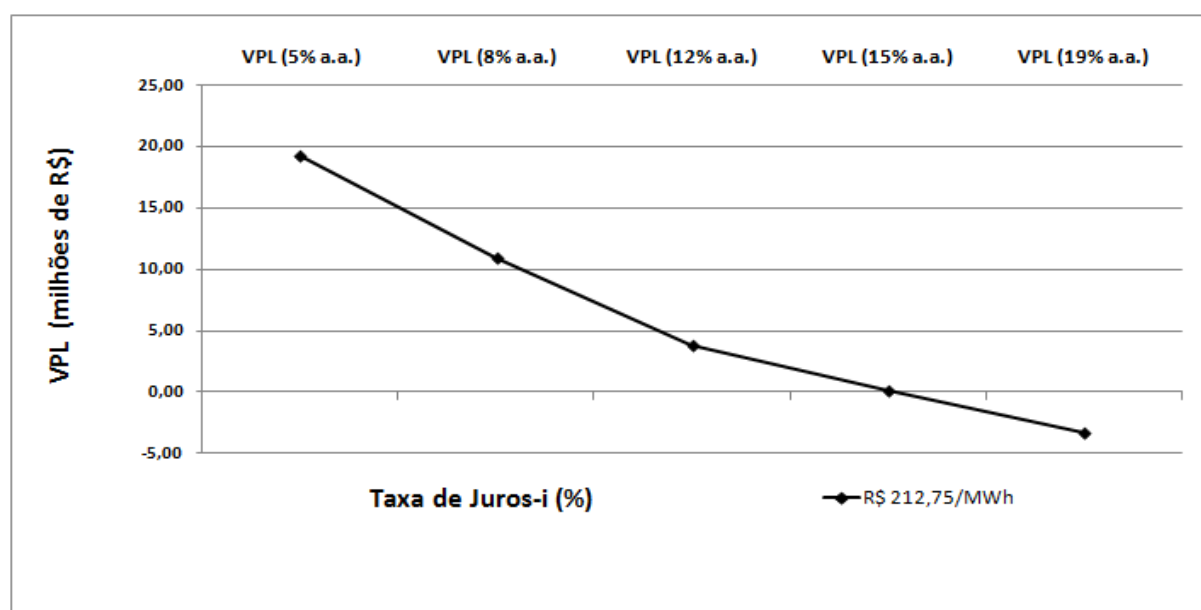


Figura 6.11: Cenário 2

A figura 6.12 apresenta o valor do VPL para cada valor de tarifa, variando com os valores das taxas de juros.

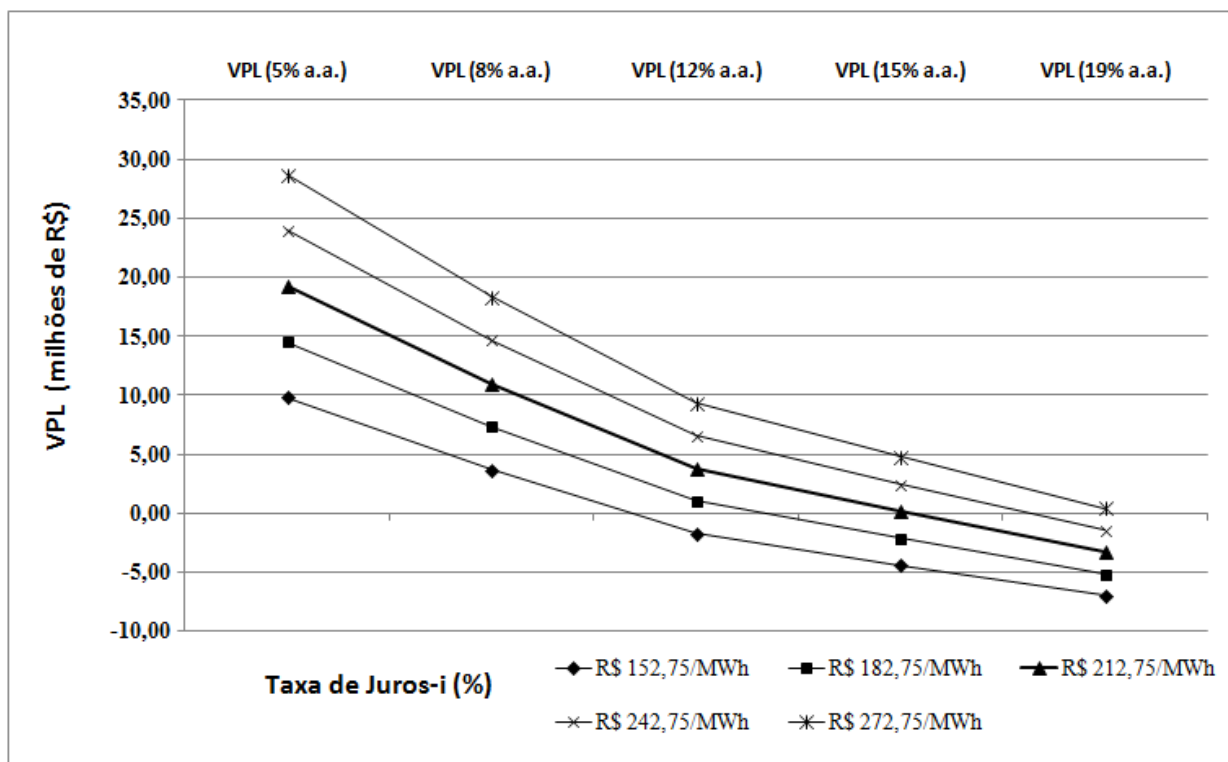


Figura 6.12: VPL quanto a variação das taxa de Juros e tarifas de energia

A determinação da TIR em função do VPL é apresentada na figura 6.13.

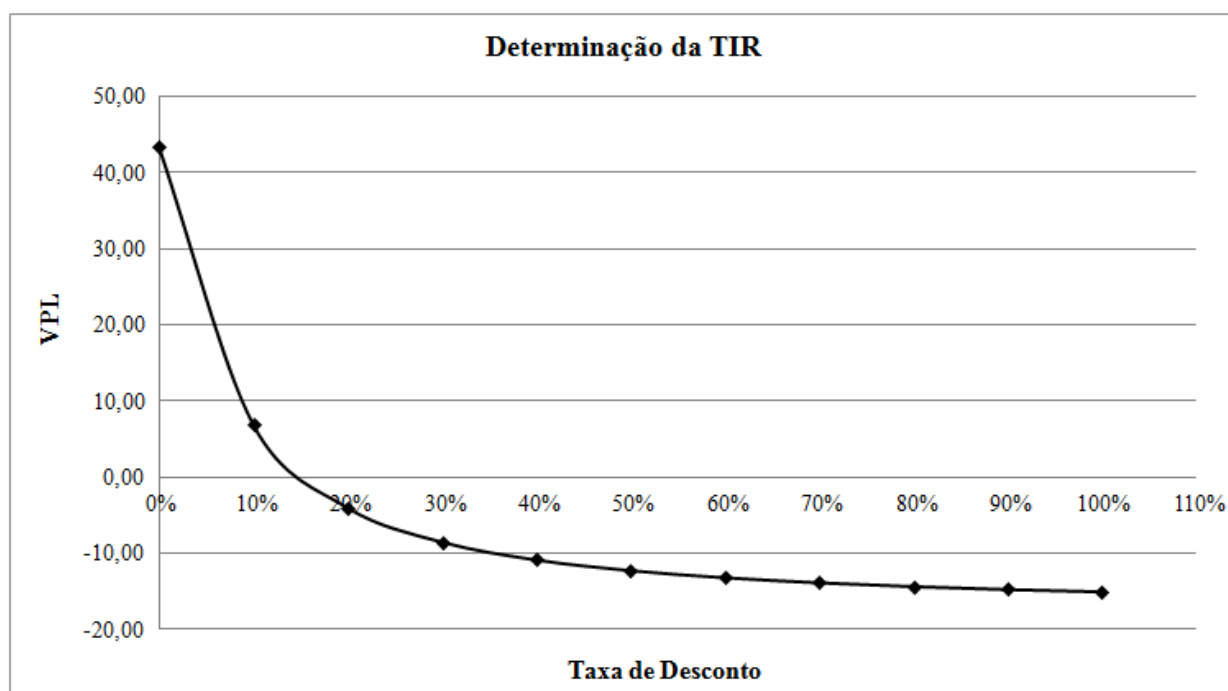


Figura 6.13: Determinação da TIR em função das Taxas de Descontos.

A partir do VPL, o empreendimento se torna viável para o valor da TIR de 15%. Na figura 6.14, apresenta-se a determinação da TIR para cada valor de tarifa.

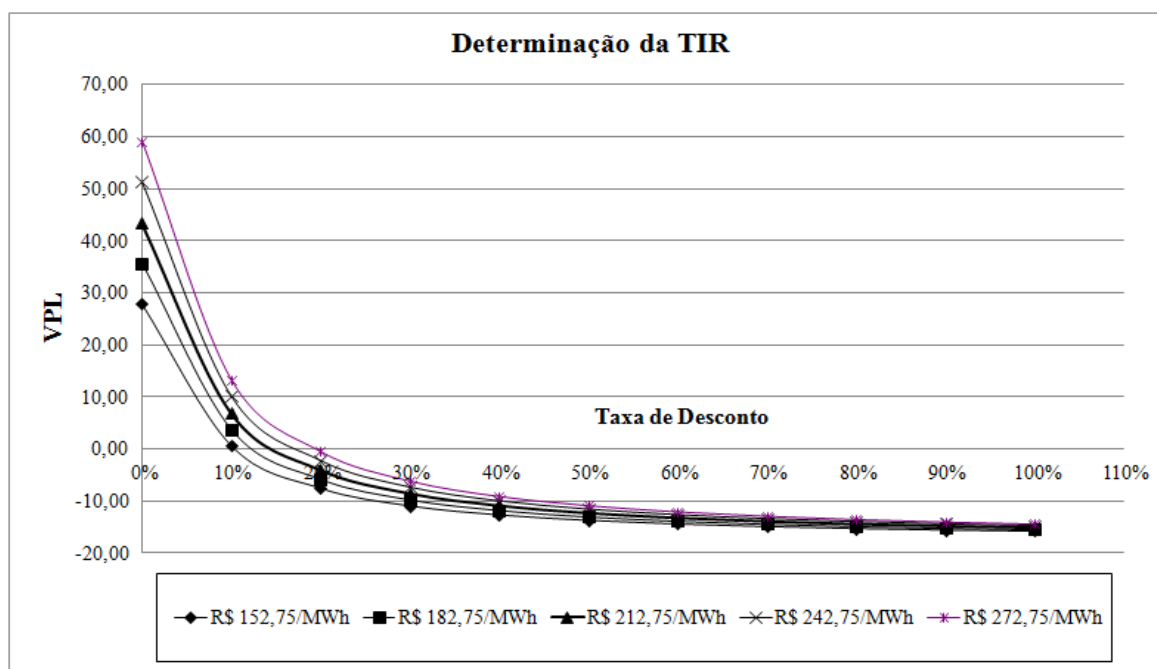


Figura 6.14: Determinação da TIR em função das taxas de descontos para a variação da tarifa de energia

A partir da figura 6.14, pode-se observar que o valor do VPL torna-se nulo, para valores de TIR entre 11 a 19%. Determinou-se também, o custo de energia nivelado de acordo com a taxa de juros, apresentado na figura 6.15.

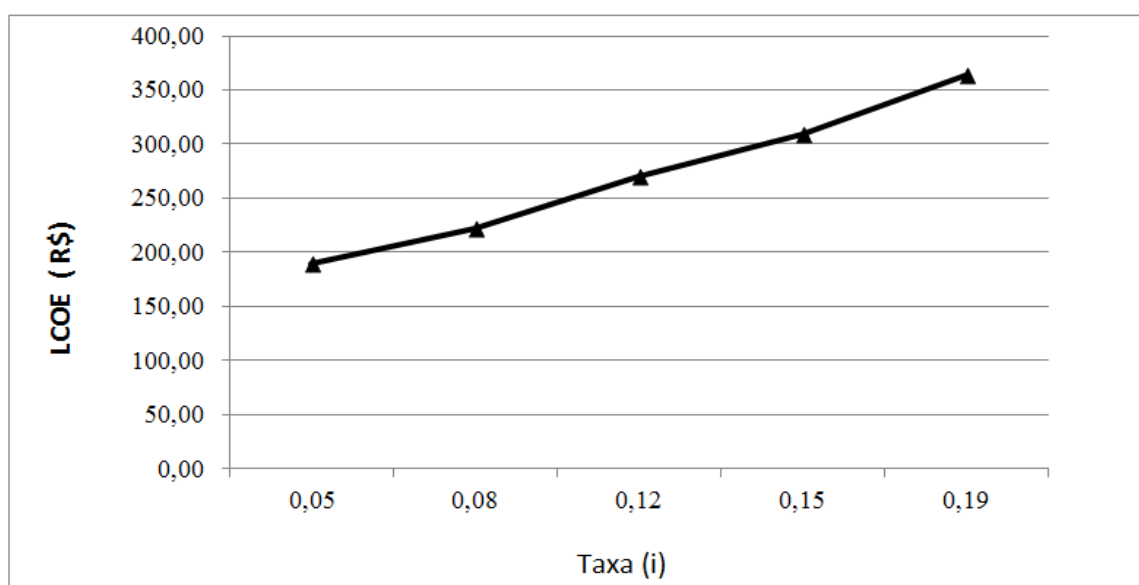


Figura 6.15: Determinação do custo de geração em função da taxa de juros

A partir desta variação dos custos de geração, pode-se observar que para o caso da taxa de 12% definida neste estudo de caso, o valor é de 269 R\$/MWh. O tempo de retorno de capital, de aproximadamente 12,5 anos, pode ser verificado na figura 6.16.

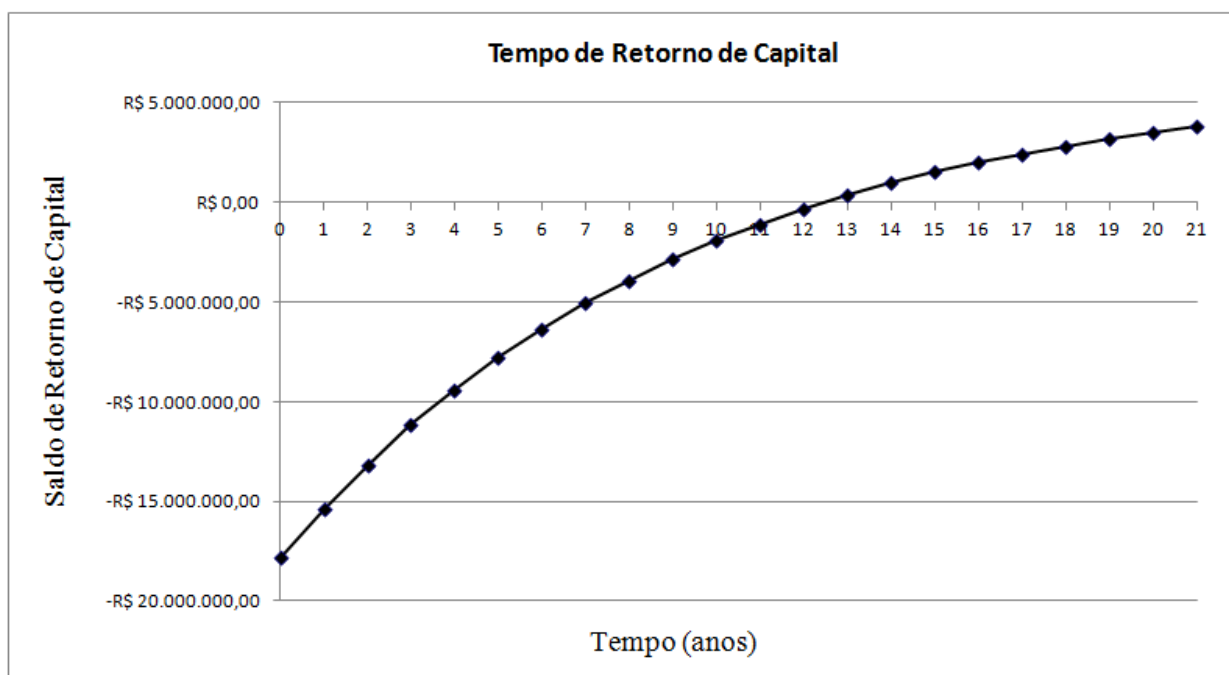


Figura 6.16: Determinação do Tempo de Retorno de Capital

7. Discussão dos resultados das duas tecnologias de aproveitamento do gás de RSU para conversão em energia elétrica

Após analisar os procedimentos para que se possa converter a energia contida nos RSU por meio dos processos de formação de gás pela da gaseificação de RSU e da degradação dos resíduos em um aterro sanitário, algumas considerações podem ser feitas.

7.1 Comparação das duas tecnologias, vantagens e desvantagens

As vantagens ou benefícios criados por essas tecnologias podem ser verificadas na tabela 7.1

Tabela 7.1: Vantagens das duas tecnologias de aproveitamento energético

Aterro Sanitário (com aproveitamento energético)	Gaseificação
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recebem os resíduos da maneira que chegam ao aterro, ▪ Geram o biogás de maneira natural a partir da degradação dos resíduos depositados, ▪ O chorume e percolados podem ser canalizados e tratados, ▪ O biogás formado pode ser convertido em fonte de energia, e obter renda com a venda de energia. ▪ Disposição correta e confinamento seguro dos resíduos, ▪ Evita a contaminação ambiental e danos a saúde pública; redução da emissão de GEE. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduz consideravelmente a quantidade de resíduos recebida, ▪ Forte economia de terreno ocupando um espaço menor que os previstos para um aterro de RSU, ▪ Eliminação segura dos contaminantes inorgânicos e orgânicos, ▪ Redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), ▪ Redução da procura de terras para a eliminação de resíduos, ▪ Redução no custo de transporte, já que RSU não seria obrigado a ser transportado para um lugar tão distante para o despejo, ▪ A partir da gaseificação dos resíduos, pode-se obter rendas com a venda de energia,

As desvantagens ou dificuldades apresentados por essas tecnologias, podem ser verificadas na tabela 7.2

Tabela 7.2: Desvantagens das duas tecnologias de aproveitamento energético

Aterro Sanitário	Gaseificação
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Precisa de grandes áreas disponíveis para implantação do aterro, ▪ Precisa de preparo prévio (impermeabilização, canalização e drenos e etc) e posterior a deposição do resíduo (monitoramento das águas subterrâneas, do chorume, e etc.) ▪ Requer tratamento e cuidado ao aterro anos depois da sua vida útil, ▪ Liberação de gases de efeito estufa, caso este não seja capturado (emissões fugitivas, podendo variar de 0,004 a 14,8% g/m² , segundo Mariano,2008). 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Precisa de um tratamento prévio antes da alimentação no gaseificador, ▪ Requer baixa umidade de chegada dos resíduos, ▪ Necessidade de grande investimento, ▪ Possibilidade de produção de gás sujo, necessitando de um caro sistema de limpeza.

A partir das tabelas 7.1 e 7.2 é possível concluir que as duas tecnologias tem as suas vantagens e desvantagens. Contudo, a opção por cada uma delas irá depender da necessidade mais apropriada para cada região do mundo, podendo optar por uma das duas ou as duas simultaneamente.

Embora esses dois métodos partam da mesma quantidade de RSU do CIMASAS, é importante ressaltar que o procedimento delas são diferentes, como:

- A gaseificação reduz mais rapidamente os resíduos, em contra partida o aterro continuará tratando desses resíduos durante um tempo maior,
- O aterro sanitário leva mais tempo para formação do biogás e aproveitamento energético deste; a gaseificação forma o gás assim que o resíduo é alimentado no reator, estando assim disponível para a conversão em energia assim que passar pelo sistema de limpeza do gás.

7.2 Quantidade de energia acumulada em vinte anos para as duas tecnologias

Em vinte anos de deposição de resíduos no aterro sanitário de Itajubá, fez-se um cálculo da quantidade de energia que cada tecnologia poderia disponibilizar, assim como a potência elétrica disponível. A tabela 7.3 apresenta estes valores.

Tabela 7.3: Potência e energia acumulada em vinte anos das duas tecnologias

Estudo para vinte anos de deposição de resíduos no CIMASAS	Gás de aterro sanitário	Gás da Gaseificação
Tecnologia de conversão energética	MCI	MCI
Produção de gás	Canalização do gás no aterro	Reator co-corrente
Potência elétrica disponível	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 143 kW (0-7 anos) ▪ 286 kW (8-20 anos) 	1,57 MW
Energia líquida anual disponível	1.757.000 (kWh)	12.377.880 (kWh)

A partir da tabela 7.3, pode-se observar que os resultados para cada uma das tecnologias são diferentes. Embora, as duas tenham utilizado como melhor opção a tecnologia de MCI.

A produção de gás é diferente, assim como a quantidade gerada. Desta forma, a potência e energia disponível para o aproveitamento energético apresentam resultados particulares para cada uma das tecnologias.

A potência disponível no aterro sanitário é bem menor que a disponível na gaseificação dos RSU; utilizando apenas de dois módulos geradores ao longo dos vinte anos. Desta forma, a energia acumulada também é menor, no entanto, possibilita mais que o abastecimento anual de uma das cidades do consórcio, Wenceslau Bras.

Já a gaseificação, que acumula uma quantidade significativa de energia, utilizou de quatro módulos geradores de energia, demonstrando ser a melhor opção no caso de aproveitamento energético do consórcio do CIMASAS.

7.3 Viabilidade econômica das duas tecnologias

Esta parte da análise, foi feita em relação aos custos, no caso, todo investimento de implantação, manutenção e retorno de capital., apresentado na tabela 7.4.

Tabela 7.4: Custos comparativos entre as duas tecnologias

Custos	Aterro Sanitário	Gaseificação
Investimento inicial	-R\$ 3,20 milhões	-R\$ 17,81 milhões
Operação e Manutenção	5% do Investimento inicial	5% do Investimento inicial
Taxa de juros	12% a.a	12% a.a
Receitas	R\$ 7,85 milhões	R\$ 79,98 milhões
Tarifa de venda de energia	R\$ 212,75/MWh	R\$ 212,75 /MWh
Custo de geração de energia	391,30 R\$/MWh	269,61 R\$/MWh
TIR	2,26%	15%
VPL	-R\$ 2,07 milhões	R\$ 3,79 milhões
PAYBACK	Depois de 20 anos	12,5 anos

Ao considerar os valores obtidos na análise, pode-se observar alguns itens foram considerados os mesmos para os dois casos, como taxa de juros, a tarifa de venda de energia e os custos de operação e manutenção.

Para o caso do aterro sanitário, o investimento e as despesas são menores, porém, a receita também é bem menor, que não é um fator positivo neste caso. Desta forma, o valor do seu VPL é negativo, e o saldo de retorno de capital passa dos vinte anos, que é o tempo de vida útil do aterro, inviabilizando totalmente o projeto para este caso.

Já a gaseificação, apresenta um investimento inicial e maiores despesas, no entanto, apresenta uma receita significativa, uma vez que não conta somente com a venda de energia, mas com a venda de reciclados. Assim, a sua TIR e VPL são positivos, e o tempo de retorno de capital é mais rápido, aproximadamente doze anos e meio; possibilitando a viabilidade do projeto.

8. Conclusões

Por meio de dados obtidos com o engenheiro ambiental responsável pelo aterro sanitário, quando foi feita a coleta de dados, permitiu atualizar a composição gravimétrica do aterro. Desta forma, também pode se fazer uma estimativa teórica da geração do biogás ao longo de sua vida útil, vinte anos, atingindo um pico de 900 toneladas de metano. A potência disponível permitiu uma análise com dois módulos geradores de potência de 143 kW, gerando em média 735 toneladas de metano/ano e uma energia líquida disponível de 1.757.000 kWh/ano, podendo abastecer um dos município do consórcio em até 100% em um ano.

Para a gaseificação, a análise foi feita baseada no gaseificador Leito Fixo Co-corrente, no entanto, os resíduos foram adotados em forma de briquetes. A potência elétrica disponível foi de 1,57 MWe, e a energia disponível de 12.377.880 kWh/ano.

A análise econômica para o Aterro Sanitário apresentou um empreendimento não viável, com um VPL negativo em relação ao investimento, custo, operação e manutenção, em relação aos vinte anos de produção de biogás. As análises de sensibilidade também apresentaram somente resultados negativos para o empreendimento, e para a TIR, uma viabilidade somente para taxas inferiores a 2,26%. O custo de geração de energia é maior, 391 R\$/ MWh .

Para a gaseificação, pode-se verificar que o empreendimento neste caso é viável. Apresentando um VPL positivo em relação ao investimento, custo, operação e manutenção, em relação aos vinte anos de gaseificação de briquetes de RSU, considerando a venda de energia, venda de recicláveis e tratamento dos resíduos. A partir do VPL, o empreendimento se torna viável para o valor da TIR de 15% e um tempo de retorno de capital em doze anos e meio.

Embora as duas tecnologias sejam diferentes, as duas apresentam fatores positivos e viabilidade econômica, de acordo com a região que se deseja tratar os resíduos. No caso do aterro sanitário, para que ele possa ter viabilidade econômica, poderia efetivar a entrada de mais municípios, aumentando a quantidade de resíduos recebida, consequentemente a quantidade de biogás gerado. Desta forma, o aterro poderá contribuir com o abastecimento de energia do próprio aterro e também de alguns dos próprios municípios integrantes.

A tecnologia da gaseificação de RSU é outra solução para resolver o problema de descarte de resíduos no país, principalmente, para regiões onde o espaço para se implantar o aterro esteja com maior dificuldade de ser disponibilizada. Outro aspecto vantajoso é a venda de recicláveis, incentivando assim, o município a gerenciar melhor os seus resíduos. Contudo, ainda faltam incentivos governamentais e até mesmo, empresariais para maiores aplicações desta

tecnologia, como é o caso do consórcio do CIMASAS, que mesmo apresentando viabilidade econômica, o município ainda não cogitou esta possibilidade. Logo, ele ainda não é uma forma de tratamento comercial.

Assim, independente destas duas tecnologias, ambas apresentam possibilidades de contribuir com a matriz energética brasileira, a partir de uma fonte alternativa de energia, além de tentar resolver um problema atual no país, como o descarte inadequado de resíduos.

9.Recomendações para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Refazer os cálculos da geração de biogás e energia líquida disponível, no caso do consórcio realmente ampliar a quantidade de municípios integrantes; uma vez que aumentando a quantidade de resíduos, conseqüentemente aumentará a geração de biogás.
- Refazer os cálculos da geração de biogás de aterro, considerando a entrada de novos municípios e também a venda de recicláveis.
- Refazer os cálculos deste último caso, considerando a taxa de tratamento de resíduos para as duas formas de tecnologia.
- Fazer um estudo da gaseificação com reatores diferentes como o de leito fluidizado, leito arrastado e toxa de plasma.

10 Anexo A : Cálculos da potência e energia produzida e disponível no gaseificador

Potência Disponível no gaseificador Co-corrente	
Massa de RDF	2,06 t/h
Massa de RDF	0,57 kg/s
PCI do RDF	14 MJ/kg
Eficiência do gaseificador	70 %
Eficiência do motogerador	28%
Fator de capacidade	0,9
Potência disponível do gaseificador	5,60 MW
Potência elétrica disponível	1,57 MW

➤ Cálculo da potência disponível no gaseificador

$$P_{prod.} = m_{RDF} * PCI_{RDF} * \eta_{gaseif.}$$

$$P_{prod.} = 2,06 \left(\frac{t}{h} \right) * 14 \left(\frac{MJ}{kg} \right) * 0,7$$

$$P_{prod.} = 2,06 * \frac{1000}{3600} \left(\frac{kg}{s} \right) * 14 \left(\frac{MJ}{kg} \right) * 0,7$$

$$P_{prod.} = 5,60 \left(\frac{MJ}{s} \right)$$

$$P_{prod.} = 5,60(MW)$$

➤ **Cálculo da energia produzida média por ano**

$$E_{prod} = P_{prod} * T.$$

$$E_{prod} = 5,6(MW) * 24(h) * 365 * FC$$

$$E_{prod} = 5,6 * 1000(kW) * 24(h) * 365 * 0,9$$

$$E_{prod} = 44.150.400(kWh).$$

➤ **Cálculo da potência elétrica disponível**

$$P_{elétrica} = P_{disp} * \eta_{motogerador}$$

$$P_{elétrica} = 5,6(MW) * 0,28$$

$$P_{elétrica} = 1,57(MW)$$

➤ **Cálculo da energia elétrica média disponível por ano**

$$E_{elétrica} = P_{elétrica} * T$$

$$E_{elétrica} = 1,57(MW) * 24(h) * 365 * FC$$

$$E_{elétrica} = 1,57 * 1000(kW) * 24(h) * 365 * 0,9$$

$$E_{elétrica} = 12.377.880(kWh)$$

11. Referências Bibliográficas

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2011. <http://www.abrelpe.org.br/panorama_envio_2.cfm>.

_____. **Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos**. 2013.

www.abrelpe.org.br/arquivos/atlas_portugues_2013.pdf.

ANDRADE, R. V. **Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental**. Tese de doutorado. Dez. 2007.

ANDRADE, R.V. **Gaseificação da biomassa e qualidade do gás**. 2013. Disponível em: http://www.ceurer2013.com.br/download/RUBENILDO_ANDRADE.pdf.

ANDRADE, R.V; LORA, E.E.S. **Bioenergia e Biorefinaria. Cana-de-acúcar e espécies florestais**. Capítulo 18, **gaseificação da madeira**. Viçosa, MG. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2004). NBR 10.004 – **Resíduos Sólidos – Classificação**. São Paulo.

_____. **NBR 13896 – Aterros de resíduos perigosos- Critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro: ABNT, 12p., 1997.

ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica. **Leilão A-3**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticia.cfm?Identidade=8753&id_area=90>. Acesso: 08/12/15.

ÁNGEL, J. D M. **Estudo Experimental do Conjunto Gaseificador de Biomassa em Reator Concorrente com Duplo Estágio de Fornecimento de Ar e Motor de Combustão Interna**. Dissertação de mestrado. 2009.

ARENA, H. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. **Waste Management**. Número 32, p.625-639, 2011. Disponível em: www.elsevier.com/locate/wasman.

ARENA, U.; ZACCARIELLO, L.; MASTELLONE, M.L. **Fluidized bed gasification of waste-derived fuels**. *Waste Management*. V. 30, pg 1212–1219, 2010. Disponível em: www.elsevier.com/locate/wasman.

ASSIS, M. R. R. et al. **PGIRSU – Plano de Gerenciamento Integrado dos Resíduos Sólidos Urbanos – do Município de Piranguinho/MG**. 2007.

BANCO MUNDIAL, 2004. Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean. World Bank – ESMAP (Energy Sector Management Assistance Programme). Prepared by: Conestoga-Rovers & Associates 651 Colby Drive Waterloo, Ontario N2V 1C2. January 2004.

_____**Estudo de Baixo Carbono para o Brasil. Relatório de Síntese Técnica Resíduos. 2010.** Disponível em: < www-wds.worldbank.org/.../698620ESW0P1050rtuguese0final009012>. Acesso: 18/04/14.

BANDEIRA, C. A. L. **Avaliação da Estabilidade Biológica de Combustível Derivado de Resíduo.** Dissertação de mestrado. 2010.

BARBOSA FILHO, A. J.et.al. PGIRSU - Plano de Gerenciamento Integrado dos Resíduos Sólidos Urbanos –do **Município de Wenceslau Bras /MG.**2007

BARROS, R. M. **Tratado sobre Resíduos Sólidos, gestão, uso e sustentabilidade.** Editora Interciência, Rio de Janeiro, editora Acta, Minas Gerais, p.374,2012.

BRASIL, H. G. **Avaliação Moderna de Investimentos.** Editora Copyright, 2002, p.222.

BELBO, H. **Technical Specifications for Solid Biofuels Evaluation of the new Technical Specifications provided by CEN/TC 335 in the Swedish Biofuel Market.** Uppsala: SLU Service/Repro, 104 p, 2006.

BELGIORNO, V.; FEO, G.; DELLA ROCCA, C.NAPOLI, R.M.A. **Energy from gasification of solid wates.**2003. *Waste Management* 23,p.1–15.Disponível em:www.elsevier.com/locate/wasman

BIDONE, Francisco Ricardo Andrade; POVINELLI, Jurandyr (1999). **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos.** Sao Carlos, EESC/USP.

BORBA, S. M. P. **Análise de modelos de geração de gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

BOVE,R.; LUNGHI,P. Electric Power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. **Energy Conversion and Management**, vol.47, p.1391-1401, 2006.

BRASIL.Decreto nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o comitê Internacional da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o comitê Orientador para a implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências.Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 de dezembro de 2010.Secão1, Edição Extra. Disponível em: <http://www.conselhos.org.br/Arquivos/Download/Upload/58.pdf>.

CAIXETA, D.M. **Geração de Energia Elétrica a partir da Incineração de Lixo Urbano: O Caso de Campo Grande/MS.** Monografia de Especialização. Brasília, 2005.

CARNEIRO, P. A. **Análise das tecnologias para gestão e reaproveitamento energético dos resíduos urbanos para reciclagem de plásticos.** 2009.

CARRARA, S. (2010). **Small-scale biomass power generation.** University of Bergamo, PhD in Energy and Environmental Technology. p. 259.

CASSINI, S. T. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rio de Janeiro: ABES, RiMa - Projeto PROSAB, 2003.

CATERPILLAR, 2014, 2015. Disponível em: http://www.cat.com/pt_BR/power-systems/electric-power-generation/gas-generator-sets/18487654.html. Acesso: 12/05/14.

http://www.cat.com/pt_BR/products/new/power-systems/electric-power-generation/gas-generator-sets/18487639.html. Acesso: 03/02/2015.

CEMPRE- Compromisso Empresarial para reciclagem. Artigos e publicações. **Plástico**. Disponível em: <http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/4/plasticos>. Acesso: 01/12/14.

_____. **Preço do Material Reciclável**. 2014. Disponível em: <http://cempre.org.br/cempre-informa/m/edicao/138>. Acesso: 12/03/15.

CETEC-FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. Cursos de capacitação. Disponível em: < www.cetec.br.>

CETESB- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Pesquisa sobre emissões de metano dos depósitos de lixo no Brasil**. São Paulo: 1999. Disponível em <<http://www.mct.gov.br>>. Acesso em Ago. 2012.

_____. **Biogás - Aterros**, versão 1.0 / CETESB, Ministério Brasileiro de Ciência e Tecnologia. São Paulo, 2006. Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Softwares/16-Softwares>>. Acesso em Fev.2014.

CHAVES, I.R.; SOUZA, O.T. **A Gestão dos Resíduos Sólidos no Rio Grande do Sul: Uma Estimação dos Benefícios Econômicos, Sociais e Ambientais**. 2012.

CIMASAS - **Consórcio Intermunicipal dos Municípios da Microregião do Alto Sapucaí para Aterro Sanitário**. <cimasas@itajuba.mg.gov.br>

COMDEP. **Aterro Controlado**. [2008]. Disponível em: <<http://www.petropolis.rj.gov.br/index.php?url=http%3A//comdep.petropolis.rj.gov.br>>. Acesso em: 26 de março de 2013.
CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **RESOLUÇÃO CONAMA**. Resolução publicada em 11 de novembro de 2008. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=592>>.

COPAM- Conselho Estadual de Política Ambiental . Deliberação Normativa, nº 07, de 19 de abril de 1994. Disponível em:< <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=107>>.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E.S. **Tecnologias de conversão energética da biomassa**. Universidade do Amazonas/Efei, Manaus, 1997.

COTAÇÃO DO DÓLAR. Disponível em: <http://economia.uol.com.br/cotacoes/>. Acesso: 16/11/15, as 16:19 hs.

DIAS, L. M. S.et. al. PGIRSU - Plano de Gerenciamento Integrado dos Resíduos Sólidos Urbanos – **Município de São José do Alegre/MG**. 2007.

EIA – U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Growth of the landfill gas industry**.1996. Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/cneaf/solar.renewables/renewable.energy.annual/chap10.html>> Acesso em: 06 de novembro de 2013.

EPA – U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Turning a liability into an asset: a landfill gas-to-energy project development handbook**. Landfill Methane Outreach Program. EPA. 1996.

_____. **Municipal Solid Waste Landfills**. Ap - 42, vol.1, ch 2.4.2011.Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/final/c02s04.pdf>.Acesso: 23/04/2014.

EPE- Empresa de Pesquisa Energética. BEN- **Balanco Energético Nacional**. 2011. Disponível em: < https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf >. Acesso: 18/03/14.

_____. **Balanco Energético Nacional**. 2015. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf. Acesso: 27/11/15.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: Guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais**. 2012.

FERNANDES, B. O. **Considerações sobre outros empregos do sensor de detonação para o controle eletrônico de motores ciclo Otto utilizando análise espectral**. São Carlos, SP, 2006. Dissertação de mestrado.

FERNANDES,L.F.R. **Determinação do Balanco Energético e de Gases do Efeito Estufa (GEE) em função do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)**.Dissertação de mestrado.Itajubá.2010.

FILHO, L. F. B., **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

GALLARDO,A.; CARLOS,M.;COLOMER,F.J.;ALBARR-AN,F. **Analysis of refuse-derived fuel from the municipal solid waste reject fraction and its compliance with quality standards**. Journal of Cleaner Production 83, 118-125, 2014.

GANDELINI, L. **Localização de aterros sanitários e lixões no Estado de São Paulo, considerando padrões ambientais distintos: uma aplicação de modelos matemáticos de otimização**. Piracicaba, 2002. Monografia (B. S.). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo.

GASIFICATION TECHNOLOGIES COUNCIL. **Waste Gasification**. Disponível em: <<http://www.gasification.org/gasification-applications/waste/>>.Acesso: 10/09/14.

GIRS- Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. **Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. 2001.

GONÇALVES, A. (2007). **Potencialidade Energética dos Resíduos Sólidos domiciliares e comerciais do Município de Itajubá – MG**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia.

GONÇALVES, A. T. T. *et al.* PGIRSU – **Plano de Gerenciamento Integrado dos Resíduos Sólidos Urbanos –Do Município de Itajubá/MG**.2007.

HASLER, P.; NUSSBAUMER, Th. **Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification**. Biomass and Bioenergy. v. 16, p. 385 – 395, 1999.

HENRIQUES, R. M. **Potencial para Geração de Energia Elétrica no Brasil com Resíduos de Biomassa através da Gaseificação**. Rio de Janeiro. 2009. Tese de doutorado. Disponível em: www.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/rachelmartins.pdf

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTÁTICA. **Censo 2010**.Disponível em:<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/tabelas_pdf/total_populacao_minas_gerais.pdf>. Acesso em: 07 de novembro de 2013.

____ **Cidades:** Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=316210>>. Acesso: 20/11/13.

____ **Projeção da população brasileira**. Disponível em:< <http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso: 03/11/15.

ICLEI- Governos Locais pela Sustentabilidade. **Manual para Aproveitamento do Biogás.Vol1.Aterros Sanitários**.Secretariado para América Latina e Caribe.Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2009.Disponível em:www.resol.com.br/cartilha12/manual_iclei_brazil.pdf.

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. v. 5** – cap. 3. Estocolmo, 2006. 40p.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. **Gestão de Resíduos sólidos na região metropolitana de São Paulo.Avanços e Desafios**.São Paulo em Perspectiva, v. 20, n. 2, p. 90-104, abr./jun. 2006 .

KINTO, O. P., GRIMONI, J. A. B., GALVÃO, L. C. R., UDAETA, M. E. M.,2003. **Energia da gaseificação de biomassa com recurso nãoconvencional para o desenvolvimento limpo**. GEPEA-USP. Disponível em: http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/CLAGT_EE2003_OscarKinto.pdf. Acesso em 03 de Junho de 2013.

KRIZAN,P.;MATÚS,M.;SOOS, L.; KERS,J.;PEETSALU,P.; KASK,U.;MENIND, A.. **Briquetting of municipal solid waste by different technologies in order to evaluate its quality and properties**. *Agronomy Research Biosystem Engineering Special Issue 1*, 115-123, 2011.

LANDIM, A. L. P F. AZEVEDO, L.P. **O Aproveitamento Energético do Biogás em Aterros Sanitários: Unindo o Inútil ao Sustentável**. Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES)

Setorial, Rio de Janeiro, n. 27, p. 59-100, mar. 2008. Disponível em: www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/.../set2704.pdf.

LEME, M. M. V. **Avaliação das Opções Tecnológicas para Geração de Energia a Partir dos Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso**. 2010. Disponível em: <http://www.MMV Leme - adm-net-a.unifei.edu.br>. Acesso Jun.2012.

LESCANO, G.M.A.; AURICH, M.R.C.; DALMAZO, C.; OHISHI, T. **Geração Descentralizada de Reservas Operativas Através do Aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos como Fonte de Energia Renovável**. XLI SBPO 2009 - Pesquisa Operacional na Gestão do Conhecimento.

LOPES, A. A. **Estudo da Gestão e do Gerenciamento Integrado dos Resíduos Sólidos no Município de São Carlos (SP)**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-06062005-163839/>. Acesso em: 15 de mar. 2013.

LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V. ARADAS, M. E. C. **Geração elétrica em pequena escala a partir da gaseificação de biomassa**. 2004. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022004000200002&script=sci_abstract&tlng=pt.

LUZ, F.C. **Avaliação Técnico-Econômica de Plantas de Gaseificação do Lixo Urbano para Geração Distribuída de Eletricidade**. Dissertação de Mestrado. 2013.

MDL- Mecanismo de Desenvolvimento Limpo aplicado a resíduos sólidos. **Redução de emissões na disposição final**. Van Elk, A. G. H.P. 2007. Disponível em: www.mma.gov.br/estruturas/.../125_publicacao12032009023918.pdf. Acesso: 25/04/14.

MAKRAY, Z. T., “**Gaseificação De Madeira Em Gaseificador Co-Corrente Para Produção De Gás De Médio Poder Calorífico E Gás De Síntese**”. Tese De Doutorado –Departamento De Engenharia Mecânica, Universidade Estadual De Campinas, 1984.

MALIK, A., NAVEED, S., AKRAMM, M. , RAMZAN, N. **Fixed Bed Gasification of Steam Treated Food Waste (FW) and Municipal Solid Wasted (MSW)**.2008. Disponível em: www.man.gov.tr/big power/full papers/12.polf.

MAYA, D.M.Y.; LORA, E.E.S. **Gasification, a sustainable alternative in the appropriate treatment of municipal solid waste in Brazil: the environmental point of view assessment**.2014. 5th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation Rio de Janeiro, Brazil

MARIANO, M.O.H. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**. Tese (Doutorado) em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pernambuco, Recife, Pernambuco, 225 p.,2008.

MARTINEZ, J. D. et al. Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines. **Renewable Energy**, v. 38, n. 8, 2012.

MELO B. A. **Avaliação Computacional de um Sistema de Gaseificação em leito Fluidizado utilizando o software CSFB.** Dissertação de Mestrado. 2008.

MMA-Ministério do Meio Ambiente. **Resíduos Sólidos.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario>>. Acesso: 28 de março de 2013.

_____**Responsabilidade Social.** Disponível em: <http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/item/9411-res%C3%ADduos-de-pl%C3%A1stico,-papel,-papel%C3%A3o,-papel-metalizado,-vidro-e-metal>. Acesso: 17/09/14.

MOTTA, A. R. et al. PGIRSU- Plano de Gerenciamento Integrado dos Resíduos Sólidos Urbanos –Do **Município de Delfim Moreira/MG.** 2007.

NASCIMENTO, J.C.F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos.** Dissertação de mestrado. São Carlos, SP. 2007. Disponível em: <www.eesc.usp.br/geopos/disserteses/nascimento.pdf>.

PAIVA, L. S. R. **Visita técnica ao aterro de Itajubá.** 2012.

PBAS- **Projeto Básico do Aterro Sanitário e Estimativa de Custos para sua Implantação.** Prefeitura Municipal de São Carlos. FIPAI - Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial. São Carlos-SP, 2008. Disponível em: www.saocarlos.sp.gov.br/.../1197643419--Projeto_Basico_Aterro.pd...

PECORA, V. FIGUEIREDO, N. J. V. COELHO, S. T. VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **Potencial de Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás por meio do Aproveitamento de Biogás Proveniente de Aterro Sanitário.** 2008. Disponível em: <cenbio. iee.usp.br/download/publicacoes/aterroagrener06jun2008.pdf>.

PERNES, A.F.B.L. Quantificação de metais em resíduos para valorização energética. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental e Sanitária. Faculdade de Ciências e Tecnologias. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 114 pp., 2008.

RIBEIRO, J. A. C. *et al.* PGIRSU – Plano de Gerenciamento Integrado dos Resíduos Sólidos Urbanos –Do **Município de Piranguçu/MG.** 2007.

RUSSO, M.; **Tratamento de Resíduos Sólidos, Universidade de Coimbra:** Portugal, 2003; http://www.uc.pt/mhidro/tratamentos_residuos_solidos.pdf, acessada em Março 2013.

SABESP- Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Acesso: 27/05/14. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/interna/Default.aspx?secaoId=61>>.

SALES, C.A.V.B. **Avaliação Técnico Econômica da Conversão da Biomassa em Eletricidade Utilizando Tecnologias de Gaseificação,** 2007.

SALOMOM, K. R. LORA, E. E. S. **Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil**. Biomassa Energia, Belo Horizonte, v. 2, n. 1, p. 19-36, 2006.

SANTOS, Guilherme Garcia Dias dos. **Análise e perspectivas de alternativas de destinação dos resíduos sólidos urbanos: o caso da incineração e da disposição em aterros**. Dissertação de mestrado. 2011. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <análise e perspectivas de alternativas de destinação dos resíduos ..www.getres.ufrj.br/pdf/guilherme_santos.pdf> Acesso em: 26 mar 2013.

SANTOS, I. F. S. **Método escalonado para otimização do aproveitamento energético do biogás de aterros sanitários: Definição e aplicação**. Dissertação de mestrado em andamento. 2015.

_____. **Produção energética nos aterros sanitários, uma alternativa para geração descentralizada**. CERPCH- Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas. 03/2015. Disponível em: <http://www.cerpch.unifei.edu.br/noticias/producao-energetica-nos-aterros-sanitarios-uma-alternativa-para-geracao-descentralizada.html>. Acesso: 03/2015.

SARAVANAMUTTOO, H.I.H.; COHEN, H.; ROGERS, G.F.C. **Gas turbine theory**. Terceira edição. 1972.

SIL SOLUÇÕES AMBIENTAIS. **O Aterro Sanitário**. Disponível em: <<http://www.sil-residuos.com.br/>>. Acesso em: 26 de março de 2013.

SILVA, T.R. **Metodologia para a determinação teórica da potência ótima conseguida a partir da combustão do biogás gerado em aterro sanitário**: Estudo de caso do aterro sanitário de Itajubá-MG. Dissertação de mestrado. 2012.

SILVA, T.N. et al. **Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte**. Eng. Sanit. Ambient. vol.18 no.2 Rio de Janeiro Apr./June 2013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522013000200001 .Acesso em 28/01/14.

SIMONE, M.; BARONTINI, F.; NICOLELLA, C.; TOGNOTTI, L. **Gasification of pelletized biomass in a pilot scale downdraft gasifier**. Bioresource Technology. 116 403–412. 2012.

TEIXEIRA, C.E.; TORVES, J.C.; FINOTTI, A.R.; FEDRIZZI, F.; MARINHO, F.A.M. (2009) **Estudos sobre a oxidação aeróbia do metano na cobertura de três aterros sanitários no Brasil**. Revista Engenharia Sanitária Ambiental, v. 14, n. 1, p. 99-108.

THEMELIS, N. J.; ULLOA, P. A. **Methane generation in landfills**. *Journal of Renewable Energy*. Número 32, pags 1243-1257. 2007. Disponível em: ; www.aseanenvironment.info/Abstract/41014160.pdf, 2006.

TILLMAN, D. A.; ROSSI, A.; VICK, K. M. **Incineration of municipal and hazardous solid wastes**. New York: Academic, 1989. 184 p.

UFRJ/COPPE. **Usinaverde**: Incineração de resíduos sólidos urbanos para evitar a formação

de metano em aterro e geração de eletricidade com aproveitamento energético para autoconsumo. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2004. 14 p.

WAGLAND, S. T. *et al.* Comparison of coal/solid recovered fuel (SRF) with coal/refuse derived fuel (RDF) in a fluidised bed reactor. **Waste Management**, v. 31, n. 6, p. 1176-1183 2011.

YOUNG, S.; YOON, S. J.; KIM, Y.K.; LEE, J.G. **Gasification and power generation characteristics of woody biomass utilizing a downdraft gasifier**. Biomass and bioenergy.35. 4215-4220.2011.

ZAFA, S. **Gasification of municipal solid waste**. The Alternative Energy e Magazine.2001.

ZANTA, V. M.; FERREIRA, C. F. A. **Alternativas de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos para pequenas comunidades**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2003.294 p . Projeto PROSAB.

Disponível em:<www.finep.gov.br/prosab/livros/ProsabArmando.pdf>.

<http://www.cempre.org.br/artigos.php>. Acesso Fev.2013.