



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

LUCIANO REIS INFIESTA

**GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) NO VALE DO
PARANAPANEMA – PROJETO CIVAP.**

São Paulo

2015

LUCIANO REIS INFESTA

**GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) NO VALE DO
PARANAPANEMA – PROJETO CIVAP.**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de Concentração: Energia.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Suani Teixeira Coelho

**São Paulo
2015**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo da Publicação
Universidade de São Paulo

INFIESTA, LUCIANO

GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) NO VALE DO PARANAPANEMA – PROJETO CIVAP. / L. INFIESTA -- São Paulo, 2015. 137 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. ENERGIA RENOVÁVEIS 2. GASEIFICAÇÃO 3. RESÍDUO SÓLIDO URBANO I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II. t.

RESUMO

A presente monografia analisa a implementação da planta de Gaseificação de Resíduos Sólidos Urbanos – Projeto CIVAP, visando a conversão energética de RSU na região, reduzindo o passivo ambiental, e atendendo à lei 12.305/10 – Política Nacional de Resíduos Sólidos, a qual dispõe datas limites para a destinação final dos resíduos urbanos e impõe o ano de 2014 como data marca para eliminação dos “lixões”, local de disposição de resíduos urbanos e industriais sem controles ambientais, além de exigir que os RSU não sejam depositados em aterros sanitários sem tratamentos intermediários. Assim é analisado o projeto CIVAP, na região do Vale do Paranapanema - um empreendimento de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da gaseificação da matéria orgânica e inorgânica presente no resíduo e posterior geração de energia elétrica por ciclo Rankine, a partir do gás de síntese produzido, com potência elétrica instalada de 8.2 MW. O processo de gaseificação de RSU terá por finalidade eliminar o passivo atual com posterior geração de energia elétrica para comercialização; desta forma, estará atendendo à crescente demanda de energia elétrica do país; gerando receita ao município através da mão de obra local e dos impostos sobre o faturamento do empreendimento; e tendo ainda participação na logística reversa de produtos.

Palavras Chave: Gaseificação, Resíduos Sólidos Urbanos, Energia Elétrica.

ABSTRACT

The gasification project of Municipal Solid Waste, will be designed founded on a noble take for urban waste, environmental liabilities and compliance with Law 12,305 / 10 - National Policy on Solid Waste, which has deadlines for the disposal of municipal waste and imposes the year 2014 as the date mark for elimination of "dumps", place of disposal of municipal and industrial waste without environmental controls. So we propose a project aiming to deploy the Paranapanema Valley region, a project of treatment of municipal solid waste through the gasification of organic and inorganic matter present in the residue and subsequent generation of electricity by Rankine cycle, from the gas synthesis produced with an installed electric power of 8.2 MWh. The gasification system would aim to eliminate the current liability with subsequent generation of electricity for marketing this out, we are meeting the growing demand for electricity in the country; generating revenue to the city by local labor and taxes on the earnings of the enterprise; and still having interest in reverse logistics products.

Keywords: Gasification, Solid Waste, Energy

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Geração de RSU.
- Figura 2** – Destinação Final dos RSU Coletados no Brasil.
- Figura 3** – Demanda Energética Brasileira.
- Figura 4** – Localização do Vale do Paranapanema.
- Figura 5** – Recuperação Energético do RSU.
- Figura 6** – Fluxo do Incinerador.
- Figura 7** – Fluxo de Entradas e Saídas.
- Figura 8** – Usina de Bilbao – Espanha.
- Figura 9** – Contribuição do cromo- Cr na corrosão dos aços.
- Figura 10** – Deposição dos RSU em células.
- Figura 11** – Produção dos componentes do biogás em relação ao tempo.
- Figura 12** – Captação do metano em aterros sanitários.
- Figura 13** – Perfil Típico no Maciço Sanitário.
- Figura 14** – Matriz Mundial de Gaseificação por combustível.
- Figura 15** – Capacidade Mundial de Geração de Gás de Síntese.
- Figura 16** – Gaseificadores de leito fixo – Contracorrente e Concorrente.
- Figura 17** – Gaseificador de leito de arraste.
- Figura 18** – Comportamento do leito fluidizado x velocidade do gás.
- Figura 19** – Distribuidor do leito fluidizado.
- Figura 20** – Gaseificador de leito fluidizado circulante.
- Figura 21** – Classificação dos Gaseificadores por Tamanho.
- Figura 22** – Gaseificador de leito fixo de carvão mineral – 6 MWth
- Figura 23** – Vista Externa da Planta Piloto em Mauá-SP
- Figura 24** – Vista Interna da Planta Piloto em Mauá-SP
- Figura 25** – Fluxograma de processo
- Figura 26** – Sistema de Extração de Cinzas e Alimentação.
- Figura 27** – Sistema de Supervisório.
- Figura 28** – Moto gerador 180 kW, Forno e “Flare”.
- Figura 29** – Aproveitamento Energético.
- Figura 30** – Resultados Financeiros.
- Figura 31** – Aproveitamento Energético do RSU.
- Figura 32** – Localização Usina de Gaseificação.

Figura 33 - Aeroportos Públicos na Região.

Figura 34 – Área de abrangência dos Municípios Geradores de Resíduos.

Figura 35 – Mapa climático do Estado de São Paulo.

Figura 36 – Prensa Desaguadora de RSU com 400 tf.

Figura 37 – Estudos da absorção de água e a sua influência no crescimento de microrganismos.

Figura 38 – Relação entre a temperatura e a taxa de crescimento dos diferentes tipos de microrganismos.

Figura 39 – Arranjo Geral Empreendimento CIVAP.

Figura 40 – Fluxograma de processo de produção do CDR.

Figura 41 – Recepção e pesagem do RSU.

Figura 42 – Processo de Trituração < 50 mm do RSU.

Figura 43 – Linha de Processamento de RSU.

Figura 44 – Processo de Prensagem e Enfardamento do CDR.

Figura 45 – Processo de Embalo do CDR.

Figura 46 – Transporte e Estocagem do CDR.

Figura 47 – Gás de Síntese de RSU.

Figura 48 – Gaseificador de Leito Fluidizado Circulante.

Figura 49 – Caldeira a Gás.

Figura 50 – Turbina a Vapor Modelo TXC.

Figura 51 – Fluxograma de Processo.

Figura 52 – Retorno Financeiro.

Figura 53 – Galpão da Linha de CDR em construção.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** – Quantidade de Municípios por tipo de destinação adotado.
- Tabela 2** – Composição média do gás de síntese, poder calorífico e qualidade do gás de síntese.
- Tabela 3** – Características dos gaseificadores.
- Tabela 4** – Comparação entre os diferentes tipos de gaseificadores.
- Tabela 5** – Comparativo entre tecnologias.
- Tabela 6** – Poder Calorífico do RSU.
- Tabela 7** – Premissas Incineração.
- Tabela 8** – Premissas Aterro Sanitário.
- Tabela 9** – Premissas Gaseificação.
- Tabela 10** – Classificação Climática Koppen – IAC.
- Tabela 11** – Composição Gravimétrica Media no Brasil.
- Tabela 12** – Composição Gravimétrica da Região do Vale do Paranapanema.
- Tabela 13** – Etapas da Bioestabilização.
- Tabela 14** – Monitoramento da Qualidade.
- Tabela 15** – Composição Gravimétrica do RSU.
- Tabela 16** – Composição CDR.
- Tabela 17** – Balanço Energético.
- Tabela 18** – Balanço de Massa.
- Tabela 19** – Volume de gases de síntese.
- Tabela 20** – Composição do gás de síntese.
- Tabela 21** – Geração de Vapor.
- Tabela 22** – Dados da Turbina a Vapor.
- Tabela 23** – Dados de Geração de Energia Elétrica.
- Tabela 24** – Investimentos.
- Tabela 25** – Fluxo de Caixa.
- Tabela 26** – Custo de Operação e Manutenção Linha de CDR.
- Tabela 27** – Custo de Operação e Manutenção Gaseificação.

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	11
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. Geração Distribuída e Descentralizada.	15
2.2. Cenário Nacional – BRASIL	17
2.3. Cenário Estadual em SP	19
2.4. Cenário Regional	21
2.5 Aspectos Legais.....	24
2.5.1 Aspectos Legais – União.....	24
2.5.2 Aspectos Legais – Estado de São Paulo.....	26
2.6. Modelo de Recuperação Energética de RSU.	26
2.6.1. Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos.....	29
2.6.2. Biogás de aterro sanitário.....	38
2.6.3. Gaseificação de Resíduo Sólido Urbano	43
2.6.3.1. O que é Gaseificação.....	44
2.6.3.2. Modelos de Gaseificadores	47
2.6.3.3. Planta em Leito Fluidizado em Escala Industrial.....	54
2.7. Considerações Preliminares.....	59
3- ESTUDO ECONÔMICO	63
3.1 Custos de Investimento em Incineração.....	64
3.2 Custos de Investimentos em Aterro sanitário com aproveitamento do biogás.	65
3.3 Custos de Investimentos em Gaseificação.....	66
4- PROJETO CIVAP.....	70
4.1. Objetivo.....	70
4.2. Localização	70
4.2.1 Clima Regional.....	74
4.2.2 Predominância dos Ventos e Insolação.....	76
4.3 Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	76
4.3.1 Definição de CDR.....	79
4.3.2 Métodos de Processamento e Industrialização de Resíduos Sólidos.	80
4.3.3 Caracterização Biológica dos Resíduos	81
4.3.3.1 Carbono	81
4.3.3.2 Oxigênio.....	82
4.3.3.3 Teor em Água	82
4.3.3.4 Fauna Própria	83
4.3.4 Monitoramento da qualidade do CDR.....	85
4.4 Fluxograma de Processo e Balanço de Massa.....	87
4.5. Viabilidade Econômica	101

5- CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	106
6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109
7- ANEXO.....	114

1- INTRODUÇÃO

De acordo com o Dicionário de Aurélio Buarque de Holanda, "lixo é tudo aquilo que não se quer mais e se joga fora; coisas inúteis, velhas e sem valor."

Já a Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT define o lixo como os "restos das atividades humanas, considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis, podendo-se apresentar no estado sólido, semissólido ou líquido, desde que não seja passível de tratamento convencional."

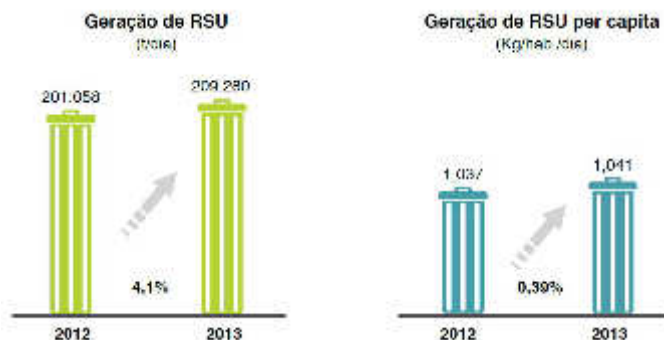
Neste projeto, resíduo sólido ou simplesmente "lixo" é todo material sólido ou semissólido indesejável e que necessita ser removido por ter sido considerado inútil por quem o descarta, em qualquer recipiente destinado a este ato.

Mas também há de se destacar, que aquilo que já não apresenta nenhuma serventia para quem o descarta, para outro pode se tornar matéria-prima para um novo produto ou processo. Nesse sentido, a ideia do reaproveitamento do lixo é um convite à reflexão do próprio conceito clássico de resíduos sólidos. É como se o lixo pudesse ser conceituado como tal, somente quando da inexistência de alguém para destinar a uma nova utilização além do clássico envio aos aterros sanitários.

Vivemos numa sociedade organizada e que estimula o consumo e a produção em grande escala e cuja capacidade de deposição dos resíduos em aterros sanitários se encontra próxima dos limites. A filosofia do descartável e do excesso de embalagens predomina em diversos setores do mercado o que significa diretamente mais rejeitos.

Os dados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, divulgado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2013) mostram que no Brasil, a cada dia, são geradas 201.058 toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU); segundo as empresas de limpeza pública de atuação nacional, há um crescimento em torno de 5% ao ano na quantidade de lixo gerado. Grande parte do lixo ainda não é coletada permanecendo junto às residências. A produção de lixo "per capita" hoje (2015) conforme figura 1, gira em torno de 1.041 g por habitante/dia e há poucos aterros sanitários ou aterros controlados no Brasil. Em São Paulo, por exemplo, estima-se que cada habitante produza mais de 1 kg de lixo por dia, e este valor tende a crescer, tornando a problemática do lixo inexorável e irreversível.

Problemas sérios causados pela precária disposição final do lixo como a disseminação de doenças, a contaminação do solo e de águas subterrâneas pelo chorume, a poluição pelo gás metano (gerado na decomposição da matéria orgânica presente no lixo), a falta de espaço para o armazenamento, a indisponibilidade de novas áreas licenciadas para abertura de novos aterros baseados nas novas diretrizes da lei nº 12.305, de agosto de 2010 – Política nacional de Resíduos Sólidos, confirmam a necessidade de alternativas eficazes e efetivas contra este cenário atual.



FONTES: Pesquisas ABRELPE e IBGE

Figura 1 – Geração de RSU

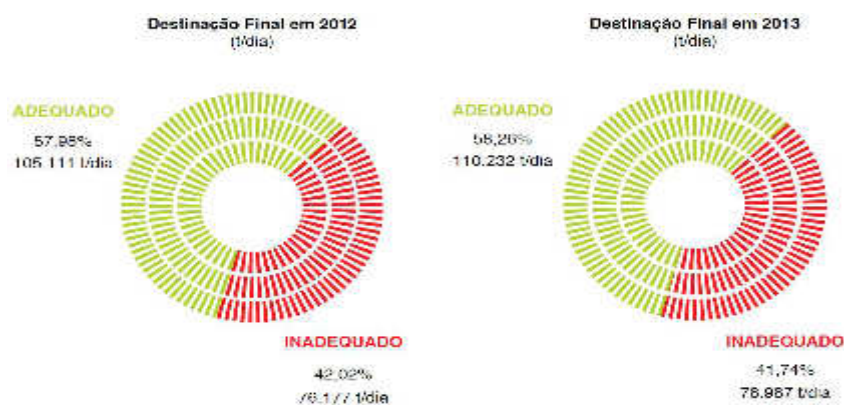
Muito se tem falado sobre a sustentabilidade e as ações necessárias para um futuro consciente e promissor para a humanidade sem que seja comprometido o desenvolvimento atual, o qual é indispensável à evolução da sociedade. É preciso que empregos sejam gerados, alimentos sejam produzidos, moradias sejam construídas, que a indústria siderúrgica e mecânica sejam ampliadas. Novas tecnologias sejam pesquisadas e implantadas e que haja energia elétrica para garantir o desenvolvimento dessas ações. Tudo com o menor impacto ambiental possível. O país necessita de energia elétrica para promover o desenvolvimento industrial, comercial, meios de transporte e comunicação, além de satisfazer o conforto esperado pela sociedade organizada.

Partindo deste princípio, a recuperação de energia a partir do RSU no Brasil tinha, até então, duas grandes vertentes:

1. A recuperação do gás metano (biogás) em aterros sanitários para geração de energia. A decomposição anaeróbica pode gerar 350 a 500 Nm³ de gás metano por tonelada de lixo brasileiro (CETESB/SMA 2003).
2. Incineração do lixo “in natura” visando a sua redução com recuperação de energia (ainda em fase de implantação).

Ao contrário do que se apregoa, a deposição em aterros sanitários não é a melhor solução para os resíduos sólidos urbanos, visto que o principal problema desta metodologia é a falta de áreas licenciadas disponíveis nas regiões metropolitanas em seus entornos, principalmente na região de São Paulo-SP. Outros problemas inerentes ao processo também contribuem para a busca de uma nova solução como: as emissões de poluentes (gás e efluentes) não deixam de existir, a percolação dos resíduos líquidos (chorume) no solo, procriação de pragas e doenças ao redor destes “empreendimento” e a causa humanitária de famílias que sobrevivem dentro de “lixões” gerados em pequenos municípios.

Neste caso, apenas um fator poderá ser positivo, que é a produção de biogás. A simples captação de biogás, embora seja uma medida de aproveitamento, só pode ocorrer nos aterros sanitários, e esta captação somente nestes locais não é suficiente para solucionar o problema de emissões de efeito estufa, visto que apenas 58,26% da destinação final dos RSU coletados são destinados a locais adequados, conforme demonstrado na figura 2. Deve ser também considerado, que o grande potencial energético contido no resíduo ficará enterrado e em curva acentuada de perda de poder calorífico, além da massa sólida que sobra (plásticos, vasilhames, estopas, etc.) por vários anos e que poderia ser tratada e monitorada. Além disto, a captação do biogás tem eficiência limitada, havendo grandes perdas de gás para a atmosfera. Além disso, o metano (principal componente do biogás) é 25 vezes mais poluente que o gás carbônico no efeito estufa (IPCC, 2007). Dentre as desvantagens dos aterros encontram-se também o alto custo de implantação e o curto tempo de vida útil.



FONTES: Pesquisas ABRELPE

Figura 2 – Destinação Final dos RSU Coletados no Brasil

A segunda opção atualmente em discussão no Brasil, o processo de incineração, consiste na queima direta dos resíduos em fornalhas convencionais acopladas a caldeiras aquatubulares e com geração em ciclo a vapor. Este processo é utilizado em grande escala, porém com altos custos de instalação devido, além de suas dimensões que diminuem seu custo específico (R\$/MWh) mas oneram o custo total do empreendimento, aos filtros para contenção e limpeza dos gases (dioxinas e furanos) resultantes da combustão com excesso de ar, tendo em vista ser um combustível sólido. A limpeza dos gases nestes equipamentos é de suma importância e deve ser eficiente devido à formação dos compostos de alta toxicidade formados na combustão dos RSU.

Baseado no descrito acima, e como objetivo principal deste trabalho, uma terceira vertente altamente eficaz será proposta para o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, o sistema de gaseificação de RSU.

No caso, será analisada a implantação de uma unidade de gaseificação na região do Vale do Paranapanema que contará com a recepção de resíduos de nove municípios - Assis, Borá, Cândido Mota, Lutécia, Marília, Ourinhos, Palmital, Platina e Tarumã – correspondendo a 450 toneladas de resíduos por dia classe II¹. Deste processo obtém-se um gás combustível com posto basicamente de hidrogênio, monóxido de carbono e metano, denominado “gás de síntese”, com maior rendimento global térmico e com maiores opções de utilização, em particular a geração de energia elétrica por meio de moto geradores para potências instaladas inferiores a 2 MW ou ciclo Rankine com caldeira e turbina a vapor, o qual possui ganho de escala econômico de instalação e manutenção, para empreendimentos com potência instalada superiores a 2 MW.

A monografia proposta será composta de capítulos que descreverão as tecnologias atualmente utilizadas na destinação final do RSU, bem como o seu melhor aproveitamento energético visando a produção de energia elétrica como produto final. Também serão debatidas suas vantagens e desvantagens técnicas de cada tecnologia bem como suas viabilidades econômicas. Por fim,

¹ Segundo a norma ANBT NBR 10004, são classificados como não inertes, podendo ter propriedades, tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. Oriundos dos serviços de limpeza de áreas que não estejam contaminados por resíduos de processo industrial.

será demonstrado um caso real de uma usina de aproveitamento energético de RSU em Palmital-SP denominado Projeto CIVAP.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Geração Distribuída e Descentralizada.

Devido à crise energética ao qual o Brasil vem passando nos últimos anos, por falta de investimentos em fontes de geração elétrica de base, ou seja, usinas hidroelétricas e térmicas, repercutirão futuramente em aumentos crescentes na conta de energia elétrica, “apagões” e impactos diretos na economia financeira do país. A geração distribuída e descentralizada torna-se neste momento uma alternativa sustentável para a crescente demanda energética do setor, visto que o sistema interligado nem sempre conseguem atender todas as possíveis demandas de cargas isoladas e o atendimento destas pequenas cargas, nem sempre é economicamente viável em um país de grande extensão territorial como o Brasil.

Geração distribuída ou descentralizada, denomina-se na produção de energia elétrica próxima ao ponto de consumo, podendo ser este ponto de consumo um usuário isolado ou grupo de usuários. A característica principal da geração distribuída é a utilização de micro ou mini geradores acionados a partir de fontes alternativas, ou mais conhecidas como energia limpa ou renovável.

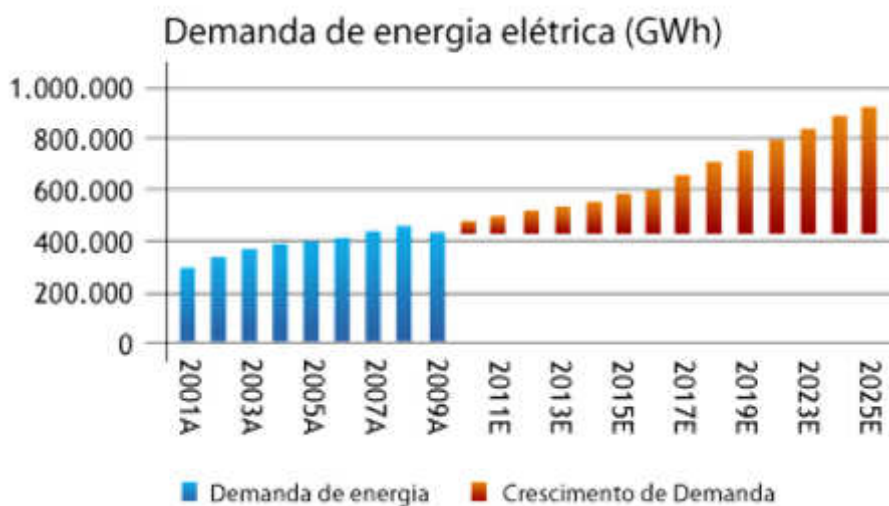
A geração local distribuída representa uma possibilidade concreta para a redução da curva de carga atualmente crescente, reduzindo o consumo em horários de demanda máxima, diminuindo a necessidade de investimentos na geração, transmissão e distribuição do sistema elétrico integrado brasileiro. A pequena geração contribui para sanar a preocupação com o consumo de eletricidade local, principalmente nos aspectos do uso eficiente. Assim, se espera que adotando tal tecnologia, diminua o consumo específico, sem prejuízo da qualidade dos serviços, do bem-estar e do conforto do consumidor. Ou seja, ter um consumo de energia menor para o mesmo serviço. A descentralização de fontes na matriz elétrica, irá contribuir para diminuição da necessidade de construção de novas usinas de base térmicas e hidrelétricas e obviamente, diminuir o impacto ambiental local e regional.

A geração distribuída pode ser observada tanto para sistemas isolados como para sistemas interligados com redes de concessionárias ou permissionárias,

adotando-se neste caso um processo de compensação entre as duas vertentes da energia.

O processo da produção de energia elétrica através da geração distribuída compreende diversas etapas e segue regras rigorosas de operação e proteção dos sistemas interligados.

A ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, através de Resoluções Normativas e de instruções próprias regulamentou tais processos, determinando, inclusive às distribuidoras, a publicação ao público um manual de instrução, que contenha informações suficientes para que os interessados possam ingressar nestes projetos. Conforme a própria ANEEL, o país terá que dobrar sua capacidade instalada nos próximos quinze anos para sustentar o ritmo do crescimento da demanda por energia, previsto em cerca de 4,5% a.a., conforme demonstrativo do MMI Energia na figura 3. Oferecendo, grandes oportunidades para a expansão da geração distribuída de fontes alternativas.



FONTES: MMI Energia, 2013

Figura 3 – Demanda Energética Brasileira.

Sendo assim, os resíduos sólidos urbanos, possuem um papel fundamental neste desenvolvimento descentralizado de geração de energia elétrica através da cogeração, visto que a geração dos resíduos sólidos, também tendem a ser descentralizada juntamente com o desenvolvimento populacional acima mencionado. Esta distribuição geográfica de geração de resíduos, diminui os custos de investimentos em redes de transmissão e distribuição bem como satisfaz a demanda energética local ou regional por meio do sistema interligado

caso necessário. Outros benefícios na utilização dos resíduos sólidos urbanos na geração distribuída são a redução das perdas do sistema por se tratar de geração “in loco”, alívio no congestionamento do sistema de transmissão, aumento da confiabilidade do sistema de distribuição, melhora da qualidade da energia e mitigação dos impactos ambientais causados pela falta de destinação correta dos resíduos em áreas menos desenvolvidas ou isoladas bem como a diminuição das emissões de CO₂ proveniente da geração de energia por meio de combustíveis fósseis atualmente utilizados.

2.2. Cenário Nacional – BRASIL

No Brasil, ocorreu a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, Lei nº 12.305/10, ou seja, uma nova etapa para a gestão dos resíduos sólidos urbanos, com incentivos econômicos e ambientais, no âmbito federal e estadual, o qual em agosto de 2014, expirou um dos prazos da lei. Mediante manifestação dos prefeitos, foi requerida sua prorrogação para 2016, pois o aporte de recursos financeiros da União destinados a custear a elaboração dos planos municipais de gestão de resíduos sólidos e a aquisição de equipamentos pelas cooperativas e associações de catadores foi considerado problemático. O relatório dos prefeitos, informa que esses valores são insuficientes em relação à demanda, além de, muitas vezes, estarem sujeitos a cortes. A solicitação foi vetada pelo presidente em exercício, Michel Temer e sua decisão foi publicada no Diário Oficial da União (DOU) no dia 14 de novembro de 2014, desta forma os gestores que não implantarem aterros sanitários ou cometerem outras infrações previstas na lei poderão ser punidos com detenção ou multa, cujo valor pode chegar a R\$ 50 milhões.

A PNRS define que, de acordo com GINA (2011), os resíduos são sobras, restos, tudo aquilo que resta e que é remanescente da cadeia produtiva, mas que ainda pode sofrer processo de tratamento e recuperação para reutilização, enquanto os rejeitos são os resíduos sólidos que já sofreram processo de tratamento e não apresentam alternativa a não ser a disposição final.

A Lei nº 12.305/10 é liberal em disposições a respeito da reciclagem de resíduos, de coleta seletiva e de reutilização de resíduos, prevendo, inclusive, tais formas de destinação final ambientalmente adequada (art. 3º, VII);

“VII - destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o

aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;” E como princípio da PNRS (art. 6º, VIII), dentre outras disposições já acima citadas, há o item abaixo:

“VIII - o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania; ”

A Política Nacional, ainda estabelece um prazo, conforme o art. 54, e art. 9, § 1o, de 4 anos da publicação da lei para a disposição ambientalmente adequada, podendo ser inclusive utilizada tecnologias visando a recuperação energética (§ 1o). Na avaliação da relatora do tema, a senadora Vanessa Grazziotin, a legislação que rege a PNRS, apesar de adequada e bem elaborada, não foi realista ao dar aos municípios quatro anos para erradicarem os lixões. A data-limite foi em agosto de 2014, o que não ocorreu.

“Art. 9o Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

§ 1o Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.” Para a CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, ligada à secretaria do Meio Ambiente do governo paulista, a legislação que estabelece diretrizes e condições para a operação e o licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos em Usinas de Recuperação de Energia – URE é a resolução SMA nº 79 de 04 de Novembro de 2009, considerando os princípios e diretrizes da Lei Estadual nº 12.300, de 16 de março de 2006, que instituiu a política estadual de resíduos sólidos bem como o disposto na resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002, sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.

No mesmo viés, no cenário nacional, a resolução da ANEEL nº 271/2007, estabelece incentivos na transmissão e distribuição de energia por fontes oriundas de biomassa composta por resíduos sólidos urbanos.

“Art. 3º Fica assegurado o direito a 100% (cem por cento) de redução, a ser aplicado às tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, incidindo na produção e no consumo da energia comercializada pelos empreendimentos a que se refere o art. 1º desta Resolução, desde que atenda a uma das seguintes condições: ”

“IV – Aqueles que utilizem como insumo energético, no mínimo, 50% (cinquenta por cento) de biomassa composta de resíduos sólidos urbanos e/ou de biogás de aterro sanitário ou biodigestores de resíduos vegetais ou animais, assim como lodos de estações de tratamento de esgoto. ”

Visando os incentivos da ANEEL, o aumento da demanda energética do país impulsionado pela PNRS, a transformação dos “lixões” existentes no Brasil, que em 2013 somaram 1.569 unidades, distribuídos nas regiões Norte, Nordeste, Centro – Oeste, Sudeste e Sul, poderiam ser a solução da geração distribuída de energia elétrica no Brasil bem como a solução ambiental para este problema. A tabela 1 mostra que apesar da legislação ser bem clara quanto à correta disposição final dos resíduos, grande parte dos RSU produzidos ainda é aterrada de maneira incorreta, acarretando sérios prejuízos à saúde e ao meio ambiente.

Tabela 1 – Quantidade de Municípios por tipo de destinação adotado. Fonte ABRELPE 2013

Destinação Final	2013 – Regiões e Brasil					
	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	BRASIL
Aterro Sanitário	92	453	161	817	703	2.226
Aterro Controlado	111	504	148	645	367	1.775
Lixão	247	837	158	206	121	1.569
BRASIL	450	1.794	467	1.668	1.191	5.570

2.3. Cenário Estadual em SP

O Governo do Estado de São Paulo publicou o estudo, “Matriz Energética do Estado de São Paulo para o horizonte 2005-2035”, a fim de orientar ações públicas por 30 anos e propõe a busca por uma energia limpa e sustentável para orientar os investimentos no setor pelos próximos anos.

Neste estudo observou-se que a demanda de energia obtida pela taxa de evolução do Produto Interno Bruto - PIB para São Paulo é de 3,5% ao ano (2005-2035) devido perspectivas favoráveis de longo prazo para a economia brasileira. Segundo este estudo o consumo de energia é de 47%, 33% e 8% para industrial, transportes e residencial respectivamente no consumo total paulista. Para tanto, foi constatado que o Estado tem déficit de energia de 0,05% ao ano, aumentando a dependência energética.

Visando este déficit e a política pública Estadual da redução de 20% das emissões de carbono, o Estado busca novas tecnologias renováveis para compor sua Matriz energética no período de abrangência deste estudo, buscando gerar o mesmo nível de crescimento econômico previsto, com mais eficiência energética e menor nível de emissão e impacto ambiental.

Dentro desta visão, o Governo do Estado analisa sobre uma ótica diferenciada a questão dos resíduos sólidos urbanos, que segundo o estudo apresenta impactos socioambiental positivos. Essa visão se dá pelo potencial energético, devido a energia hidráulica no Estado já ter sido quase em sua totalidade explorada, além dos aspectos e impactos ambientais causados e a dificuldade do licenciamento.

O estudo conclui com o destaque da “iniciativa no Estado de São Paulo de modelagem para implantação de usina de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos (RESÍDUOS SÓLIDOS CLASSE II - A), cujos estudos preveem uma avaliação completa da viabilidade para que a iniciativa pública e/ou privada instale, no próprio estado, a primeira usina de geração de energia a partir da utilização do lixo urbano. ”

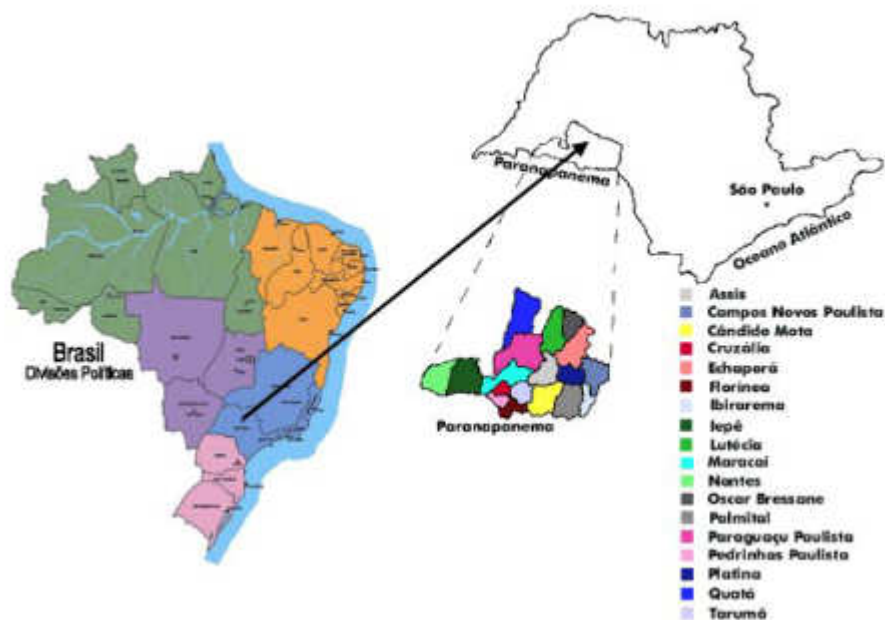
Observando ainda a questão energética, a recuperação de energia a partir do tratamento térmico de resíduos sólidos foi listada como uma tecnologia mitigadora no enfrentamento do aquecimento global, e também um Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL pelo Comitê Executivo da Convenção Quadro da ONU - Organização das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (Executive Board - UNFCCC); e que a Resolução SMA 079/2009 determina parâmetros para emissões atmosféricas provenientes de Unidades de Recuperação de Energia (URE), dedicada ao tratamento térmico de resíduos sólidos.

Dentro destes panoramas, e enfrentamento destas questões, este projeto visa a implantação de uma primeira etapa para o resolução destas ações, com a formação de combustível a partir destes resíduos sólidos.

2.4. Cenário Regional

O Cenário Regional é composto por uma demanda crescente de fatores que evidencia a necessidade da implantação de um processo rápido e eficaz para o processamento dos resíduos sólidos urbanos, visando um cenário moderno e eficiente em questões ambientais e energéticas.

Fundado em 1985, e localizado na cidade de Assis, o Consórcio Intermunicipal do Vale do Paranapanema – CIVAP representa 25 Municípios, que atuam conjuntamente em projetos e ações, promovendo uma maior eficácia em assuntos regionais sustentáveis e de integração dos municípios, na busca de soluções globalizadas e na participação de forças vivas da sociedade regional, estadual e federal. Estabelecendo parcerias entre as várias prefeituras, Governos Estadual e Federal, aumenta a capacidade regional de solucionar problemas comuns, sem lhes retirar a autonomia, assumindo desta forma o compromisso de garantir os recursos adequados para a promoção do crescimento socioeconômico e a melhoria contínua da qualidade de vida da população do Vale do Paranapanema.



FONTE: CIVAP 2011

Figura 4 – Localização do Vale do Paranapanema.

Segundo o Edital CIVAP - Consorcio Intermunicipal do Vale do Paranapanema – 04/2011, item 6.1 e 6.2, os Aterros Sanitários locais estão em fase de esgotamento e/ou esgotados, necessitando de ações urgentes para a resolução do passivo.

“6.1. A destinação final dos resíduos sólidos urbanos domiciliares surgiu da necessidade de atendimento da legislação ambiental, cada dia mais rigorosa no trato do meio ambiente, já tão devastado pela ação do próprio homem. Pesquisas realizadas mostraram existir no mercado, empresas que atuam especificamente nessa área e, que com utilização de técnicas avançadas, conseguem preparar os resíduos visando dar destinação final aos mesmos, de forma a não agredir o meio ambiente como um todo.

6.2. “Os Aterros Sanitários dos municípios consorciados estão com sua capacidade de recebimento e destinação final dos resíduos sólidos domiciliares se esgotando ou esgotadas, necessitando para tanto de uma solução urgente para estes passivos. Dada esta urgência é proposto este edital a fim de ser encontrada uma solução conjunta, definida pelo Plano de Saneamento. ”

O próprio Edital ainda fomenta que os municípios instituem a coleta seletiva, objetivando os cumprimentos de políticas e legislações.

“2.5.1. Do volume estimado a ser processado, se acha deduzida parcela relativa à coleta seletiva de resíduos implantada, ou a ser implantada em cada município aderente, a serem desempenhadas por organizações não governamentais, associações de moradores e cooperativas de catadores de material reciclável. ”

A região também encontra dificuldade na implantação de aterros sanitários, devido a vários fatores, entre eles: aeroportos públicos, áreas indisponíveis para instalação de aterros sanitários nos moldes das resoluções e normas da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e CETESB, gerenciamento destes aterros, entre outros, além disso, suas licenças de operação e suas áreas se encontram esgotadas ou próximo a se esgotar, não havendo mais espaços para novas implementações.

O município de Assis possui aterro em valas², o qual está em processo na CETESB 11/00158/92, com a licença de operação vigente por 12 meses, finalizando em fevereiro de 2012.

Este aterro em vala, localizado à Estrada Municipal ASS – 427, Água do Capão Bonito, encontra-se atualmente com sua capacidade de recepção do lixo em fase de esgotamento, tornando sua renovação e/ou ampliação impossível, devido ao grande entrave com a Unidade de Conservação Local, que tem como premissas, o art. 65 do Plano Diretor Municipal de Assis e não poderá utilizar/ampliar sua atividade atual. Atualmente o município destina seus resíduos ao aterro sanitário de Palmital-SP.

“Art. 65 - § 1º - Toda atividade ou ocupação que esteja contida na Zona de Amortecimento da Estação Ecológica de Assis será submetida à análise do órgão gestor daquela unidade de conservação”.

“Art. 65 - § 1º - Toda atividade ou ocupação que esteja contida na Zona de Amortecimento da Estação Ecológica de Assis será submetida à análise do órgão gestor daquela unidade de conservação”.

§ 2º - “O atual Aterro Sanitário Municipal, localizado no interior da Zona de Amortecimento da Estação Ecológica de Assis, terá o seu funcionamento encerrado assim que se esgotarem as possibilidades de sua utilização, implementando-se o processo de sua recuperação ambiental. ”

O outro grande problema observado é a zona aeroportuária, que impede que o Aterro Sanitário possa se instalar no local, devido a atração de aves que utilizam os resíduos como fonte de alimentação, preservando a segurança das operações de voo.

“A Portaria nº 256/CG5 de 13 de maio de 2011, implementa o Plano Básico de Gerenciamento de Risco Aviário, o qual demonstra a importância e preocupação com a segurança aérea quanto a altitude e potencial atração de aves em empreendimentos em uma distância abaixo de 20 km da AGRA – Área de Gerenciamento de Risco Aviário”.

Dentre os outros municípios integrantes deste processo, Lutécia não possui aterro sanitário, sendo que destinava seus resíduos em Paraguaçu Paulista e

² Aterro sanitário em valas é uma técnica para a disposição de resíduos urbanos no solo, em municípios de pequeno porte, onde a produção diária de lixo não deve ultrapassar 10 (dez) toneladas (CETESB 2010)

agora em Oscar Bressane. Tarumã, Palmital, Platina, Borá e Cândido Mota, estão com seus aterros sanitários se esgotando e com dificuldades de operacionalização, segundo o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PMGIRS de 2013.

De acordo com o Plano de Saneamento de Resíduos Sólidos e Manejo de Resíduos do CIVAP, todos os municípios integrantes possuem Aterro em valas. Desta forma, para o atendimento regional, foram analisados os modelos de recuperação energética a serem comentados adiante

2.5 Aspectos Legais

A seguir são apresentadas as principais normas legais e atualmente vigentes, tanto no âmbito federal, como no âmbito estadual e, as normas técnicas relativas aos resíduos sólidos que fundamentam a utilização de tecnologias para a destinação e uso correto dos resíduos.

2.5.1 Aspectos Legais – União

Decreto n.º 50.877, de 29/06/61 – Dispõe sobre o lançamento de resíduos tóxicos ou oleosos nas águas interiores ou litorâneas do país e dá outras providências;

Portaria do Ministério do Interior n.º 53, de 01/03/79 – Dispõe sobre os problemas oriundos da disposição dos resíduos sólidos;

Portaria Normativa do IBAMA n.º 1.197, de 16/07/90 – Dispõe sobre a importação de resíduos, sucatas, desperdícios e cinzas;

Resolução CONAMA n.º 2, de 22/08/91 – Estabelece que as cargas deterioradas, contaminadas, fora de especificação ou abandonadas são tratadas como fonte especial de risco ao meio ambiente;

Resolução CONAMA n.º 6, de 19/09/91 – Desobriga a incineração ou qualquer outro tratamento de queima de resíduos sólidos provenientes dos estabelecimentos de saúde, portos e aeroportos, ressalvados os casos previstos em lei e acordos internacionais;

Resolução CONAMA n.º 5, de 05/08/93 – Dispõe sobre normas mínimas para tratamento de resíduos sólidos oriundos de saúde, portos e aeroportos, terminais ferroviários e rodoviários;

Resolução CONAMA n.º 37, de 30/12/94 – Dispõe sobre as definições e classificações sobre os tipos de resíduos sólidos e dá diretrizes para circulação de resíduos perigosos no Brasil;

Portaria IBAMA n.º 45, de 29/06/95 – Constitui a Rede Brasileira de manejo Ambiental de resíduos – REBRAMAR, integrada à Rede Pan Americana de Manejo Ambiental de resíduos – REPAMAR, coordenada a nível de América Latina e Caribe pelo Centro Pan Americano de Engenharia sanitária e Ciências Ambientais - CEPIS;

Resolução CONAMA n.º 4, de 09/10/95 – Proíbe a instalação de atividades que se constituam em “foco de atração de pássaros” em Área de Segurança Aeroportuária;

Resolução CONAMA n.º 23, de 12/12/96 – Dispõe sobre o movimento trans-fronteiriço de resíduos;

Resolução CONAMA n.º 237, de 19/12/97 – Dispõe sobre o processo de Licenciamento Ambiental, e estabelece a relação mínima das atividades ou empreendimentos sujeitos a este Licenciamento. Dentre eles consta: tratamento e/ou disposição de resíduos sólidos urbanos, inclusive aqueles provenientes de fossas;

Lei n.º 9.605, de 28/01/98 – Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente e dá outras providências (conhecida como lei de crimes ambientais);

Resolução CONAMA n.º 257, de 30/06/99 – Dispõe sobre o descarte e o gerenciamento adequados de pilhas e baterias usadas, no que tange à coleta, reutilização, reciclagem, tratamento ou disposição final;

Resolução CONAMA n.º 258, de 26/08/99 – obriga as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos a coletar e dar destinação final ambientalmente adequada, aos pneus inservíveis existentes no território nacional, na proporção definida nesta Resolução relativamente às quantidades fabricadas e/ou importadas;

Decreto n.º 3.179, de 21/09/99 – especifica as sanções administrativas aplicáveis às condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, dispostas, dentre outras normas, na Lei 9.065, de 28/01/98;

2.5.2 Aspectos Legais – Estado de São Paulo

Decreto n.º 52.497, de 21/07/70 – Proíbe o lançamento dos resíduos sólidos a céu aberto, bem como a sua queima nas mesmas condições;

Lei n.º 997, de 31/05/76 – Dispõe sobre a prevenção e o controle do meio ambiente;

Decreto n.º 8.468, de 08/09/76 – Regulamenta a Lei n.º 997, de 31/05/76;

Resolução Secretaria Estadual do Meio Ambiente – SMA n.º 42, de 29/12/97 – Estabelece o Relatório Ambiental Preliminar – RAP para o processo de atividades poluidoras;

Resolução Conjunta Secretaria da Saúde – SS e SMA n.º 01, de 02/04/96 – Estabelece instruções normativas referentes aos resíduos sólidos dos serviços de saúde;

Resolução Secretaria Estadual do Meio Ambiente – SMA n.º 50, de 25/07/97 – Estabelece alterações para o processo de licenciamento ambiental de aterros sanitários, usinas de reciclagem e compostagem com recebimento inferior e superior a 10 toneladas por dia;

Lei nº 7.663 de 30/12/91 - define a Política Estadual de Recursos Hídricos e o Sistema Estadual de Recursos Hídricos. Institui o Sistema Integrado de Gerenciamento dos Recursos Hídricos e o Sistema Estadual de Gestão dos Recursos Hídricos, objeto principal da Lei;

A Lei Estadual nº 6.134, de 02/06/1988 - dispõe sobre a preservação de depósitos naturais de águas subterrâneas no estado de São Paulo. O Decreto nº 32.955 de 07.02.1991, que regulamenta a Lei nº 6.134, estipula a necessidade de caracterização hidro geológica e de vulnerabilidade dos aquíferos, assim como todas as medidas de proteção do mesmo, em todos os projetos de implementação de empreendimentos de alto risco ambiental. Também proíbe o lançamento ou transporte de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos que poluam as águas subterrâneas;

2.6. Modelo de Recuperação Energética de RSU.

A energia elétrica é um dos principais insumos da indústria assim como da maioria das atividades humanas, sendo que o crescimento populacional e econômico acarreta no aumento significativo da demanda energética (Suganthi e Samuel, 2012; Bp, 2013). O consumo de eletricidade é um indicador

importante que revela as fases de desenvolvimento de um país e os padrões de vida da sociedade. Frequentemente a maior parcela de consumo de energia em países desenvolvidos é feito pelo setor industrial (Pottmaier *et al.*, 2013).

A gestão dos recursos energéticos de maneira eficiente tornou-se indispensável entre os gestores privados e públicos (Suganthi e Samuel, 2012). Durante a última década, novos conceitos de planejamento energético e de gestão têm surgido, como o planejamento descentralizado, a conservação de energia através de tecnologias melhoradas, a eficiência energética, a reciclagem de resíduos, o planejamento energético integrado e a introdução de fontes de energia renováveis (Jebaraj e Iniyar, 2006).

A matriz energética nacional para a produção de energia elétrica está amparada pelos dois meios mais conhecidos e tradicionais de geração a energia hidráulica e a energia térmica. Outras fontes também são utilizadas para a complementação da energia demandada, como energia eólica, energia solar, energia geotérmica e etc., mas neste trabalho estaremos tratando com mais ênfase a energia térmica e suas ramificações.

Em 2011, 44% da energia ofertada (272,3 milhões de toneladas equivalentes de petróleo) aos mais de 193 milhões de habitantes do país foram provenientes de origem renovável, sendo a energia hidráulica e a biomassa as principais fontes renováveis (EPE, 2012).

A energia térmica para a geração de energia elétrica ou termoelétrica possui três (3) grupos com fontes de combustíveis variados, sendo elas;

1. Termoelétrica - Biomassa (Energia Renovável)

1.1. Cavaco de madeira

1.2. Bagaço e palha de cana de Açúcar, gramíneas e de arroz

1.3. Resíduos vegetais florestais (urbano e rural)

1.4. Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

1.4.1. Gaseificação de CDR – Combustível Derivado do Resíduo Urbano

1.4.2. Óleos obtidos por processo de gaseificação e pirólise do RSU

1.4.3. Biogás oriundo de aterros sanitários

1.4.4. Incineração de RSU

1.5. Óleos de origem vegetal (mamona, coco, babaçu, palma, etc.)

1.6. Carvão vegetal

1.7. Biogás de Biodigestores de resíduos animais e ETE – esgotos, incluindo lodo de esgoto.

2. Termoelétrica - Nuclear

3. Termoelétrica - Combustíveis Fósseis

3.1. Gás natural,

3.2. Gás GLP,

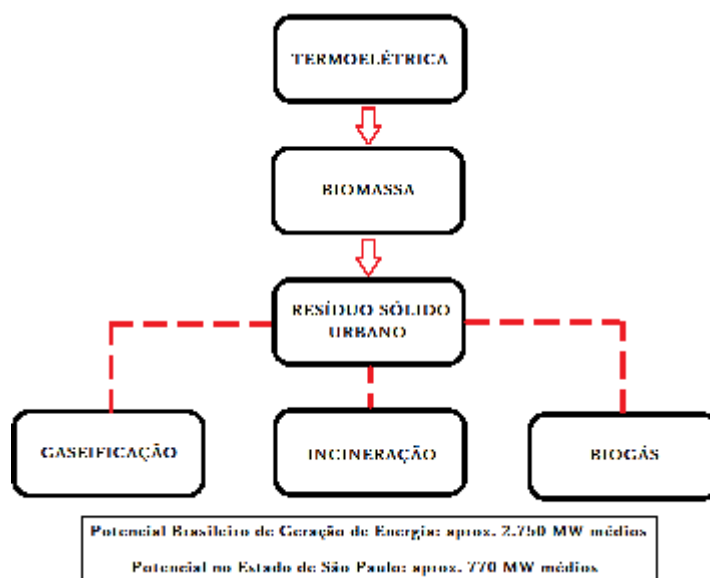
3.3. Óleos combustíveis derivados do petróleo (OC, Óleo Diesel, etc.)

3.4. Carvão mineral (carvão natural)

3.5. Gás de Xisto e Turfa

3.6. Gases derivados a atividade siderúrgica

Desta forma, a análise deste trabalho está voltada para a geração termoelétrica proveniente dos Resíduos Sólidos Urbanos – RSU, por ser uma fonte de energia substituta aos combustíveis fósseis atualmente utilizados, além do atendimento da lei 12.305/10 que propõe um destino final ao “lixo”, com participação na logística reversa de produtos como pneu e linha branca, eliminação da contaminação do solo e lençol freático pelo chorume proveniente da decomposição dos compostos orgânicos presentes no RSU e principalmente, pela utilização de uma fonte de energia descartada e inesgotável, em uma fonte de energia nobre, crescente e utilizável, como a energia elétrica. A figura 5 abaixo, mostra os caminhos de recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos.



FONTE: Elaboração Própria, 2015

Figura 5 – Recuperação Energética de RSU

Assim as fontes renováveis e sustentáveis de energia tornaram-se uma parte indispensável da matriz global energética. Estas fontes estão ganhando cada vez mais espaço entre as demais devido à intensa busca por independência energética dos países, bem como as características ambientalmente favoráveis que elas apresentam.

2.6.1. Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos

Não existe uma única alternativa para tratar a questão dos resíduos sólidos no Brasil ou no mundo. Não se pode dizer que o problema dos RSU será resolvido única e exclusivamente por um processo de mecanização, produção de biogás, incineração, gaseificação ou reciclagem, mas sim, por um conjunto de tecnologias disponíveis que irão complementar a solução dos problemas decorrentes dos resíduos.

Uma região como São Paulo, por exemplo, admite múltiplas soluções que podem ser integradas dentro de uma lógica para tratamento do problema, envolvendo inclusive as questões sociais dos catadores envolvidos em cooperativas de reciclagem. Portanto, devemos enfrentar a questão dos resíduos de uma forma muito mais séria e proporcional ao tamanho do problema, como é o caso do estado de São Paulo, onde são gerados diariamente de resíduos domésticos - RSU cerca de 59 mil toneladas por dia com uma população de 43,6 milhões de habitantes (ABRELPE e IBGE 2013). É uma quantidade imensa que exige uma solução bastante complexa. Entre as tecnologias que serão citadas neste trabalho, o incinerador será apresentado como possível solução para o problema apresentado, sendo discutidas suas vantagens e dificuldades.

A incineração é uma das formas mais frequentes para o processamento térmico de resíduos que pode ser aplicada a uma grande variedade de tipos de materiais. Ela ocorre quando há um excedente de oxigênio para completa oxidação e é possível reduzir até 90% do volume e 75% do peso inicial dos resíduos (Tabasová *et al.*, 2012).

O primeiro incinerador municipal no Brasil foi instalado em 1896 em Manaus para processar 60 toneladas por dia de lixo doméstico, tendo sido desativado somente em 1958 por problemas de manutenção. Um equipamento similar foi instalado em Belém e desativado em 1978 pelos mesmos motivos. (MENEZES, 2000; IPM, 2002).

No anexo 1, seguem as plantas de incineração instaladas no Brasil para resíduos hospitalares, resíduos industriais e químicos, bem como sua capacidade de consumo, tipo de resíduo utilizado, tecnologia utilizada e outras informações inerente ao processo. Conforme relatado por Lima (1985), no Brasil, o primeiro incinerador foi construído na cidade de Manaus, em 1896, pelos ingleses e tinha capacidade para processar 60 t/dia de lixo doméstico. Foi desativado em 1958 por não mais atender às necessidades locais e por problemas de manutenção. Em São Paulo, em 1913, foi instalado um incinerador especial, com capacidade para 40 t/dia de lixo, provido de um sistema de recuperação de energia (uma caldeira e um alternador), que devido a problemas de adaptação à rede elétrica foi desativado e substituído por motores elétricos convencionais. Este último foi desativado em 1949 e demolido em 1953 (CETESB, 1997).

O processo de incineração ou combustão (*ou mass burning*), consiste na queima em alta temperatura dos resíduos sólidos em fornos para a geração de calor para geração de vapor. A queima ocorre geralmente em dois estágios, sendo a câmara primária que é a receptora direta do resíduo, a qual possui temperatura suficientemente alta para que substâncias presentes no resíduo se transformem em gases e o restante em pequenas partículas (cinzas). Neste primeiro estágio a temperatura de trabalho está em torno de 500 °C a 900°C.

A fase gasosa gerada na câmara primária é encaminhada para a câmara secundária, onde esta mistura de gases e partículas é então queimada a uma temperatura mais alta com um intervalo de tempo suficiente para que haja a combustão completa. O tempo de residência empírico para resíduos sólidos é de 30 minutos para o primeiro estágio e de 2 a 3 segundos para a combustão dos gases no segundo estágio. Nesse caso, a atmosfera é altamente oxidante (excesso de oxigênio) e a temperatura de projeto varia normalmente entre 750°C a 1250°C. Os poluentes atmosféricos formados nesta etapa são o CO₂, água, alguns compostos denominados *dibenzo-p-dioxinas cloradas (CDD)* e *dibenzofuranos clorados (CDF)*, conhecidos comumente como dioxinas e furanos, NO_x, SO_x e HCL. A primeira etapa do tratamento dos gases consiste em resfriar os gases que saem entre 1000°C e 1200°C da câmara secundária. Nessa etapa, além de resfriarem-se os gases de combustão gera-se vapor d'água por troca térmica, que serão utilizados na conversão em energia elétrica no turbo gerador.

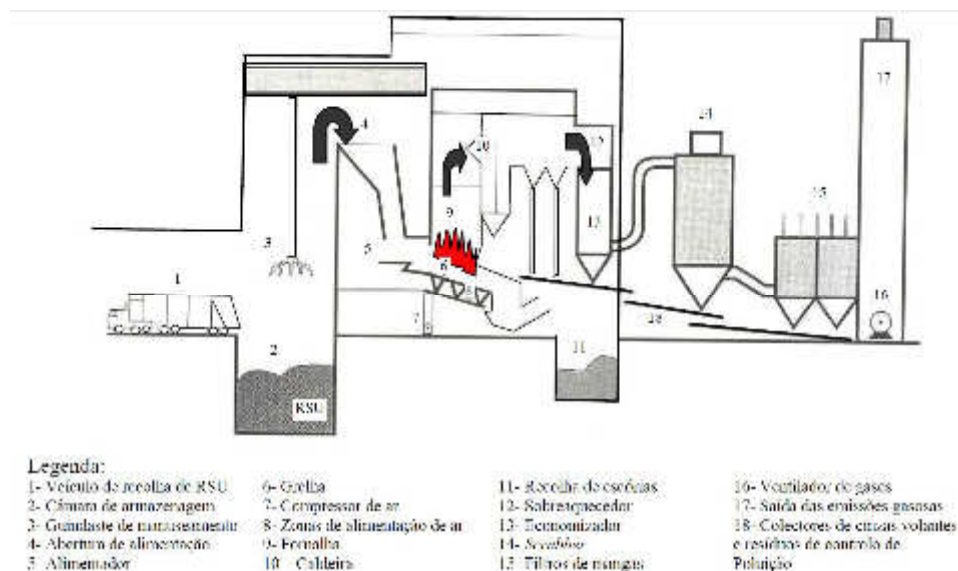
Em seguida, os gases são neutralizados com a injeção de hidróxido de cálcio (dry - scrubber), altamente eficiente na neutralização e captura de SOX e HCl. Os gases já resfriados e neutralizados passam então por um sistema de filtros tipo manga que retiram o material particulado (fuligem, sais e hidróxido de cálcio) de dimensão de até 0,1 micras. Em algumas conformações utilizam-se outros sistemas, como precipitadores eletrostáticos, lavadores Venturi, ciclones, etc.

Por fim, os gases de combustão passam por um leito absorvente, à base de carvão ativado em um leito fixo ou fluidizado, de alta área superficial que possui tripla ação:

- Retenção de óxidos nitrosos: evita-se picos de geração de NOX, eventualmente formados por distúrbios na câmara secundária, inibindo que sejam emitidos abruptamente para a atmosfera;
- Retenção de organoclorados: ação preventiva quanto à emissão de dioxinas e furanos por algum problema na câmara secundária;
- Retenção de metais voláteis: O material absorvente atua como uma “peneira molecular” retendo metais voláteis. Tanto por injeção, como através de um leito fixo, o material absorvente possui comprovadamente altíssima eficiência na retenção de metais.

Tanto os filtros mangas como os leitos de carvão funcionam tipicamente entre temperaturas de 150 e 200°C. A perda de calor ao longo do próprio tratamento de purificação de gases faz com que a temperatura na saída da chaminé seja inferior a 120°C. A maior parte dos incineradores de RSU reduziu as suas emissões de PCDD/F através da utilização de agentes químicos inibidores de formação, que podem ser inorgânicos (compostos de enxofre, compostos básicos e amoníaco) ou orgânicos (monoetanolamina, trietanolamina, ureia e etileno-glicol); de lavadores úmidos combinados com filtros manga ou precipitadores eletrostáticos; e da adsorção com carvão ativado, coque e lignita, ou através da destruição catalítica (Cheng e Hu, 2010).

A Figura 6, mostra de forma esquemática as correntes de entrada e saída de um processo de incineração de grelha – *mass burning*.



FONTES: IAWG, 1997.

Figura 6 – Fluxo do Incinerador.

Na câmara de combustão (fornalha) existem zonas com chama, onde ocorre a transferência de calor por radiação e por convecção. Nas outras zonas, em que os tubos estão na posição perpendicular ao fluxo de gases, a convecção é a forma de transferência térmica mais importante, permitindo a produção de vapor saturado. A zona do economizador tem normalmente a função de pré-aquecer a água para a caldeira. É importante que os tubos estejam colocados na vertical para evitar a acumulação de partículas sólidas sobre os mesmos, as quais poderiam funcionar como catalisador para a formação de dioxinas.

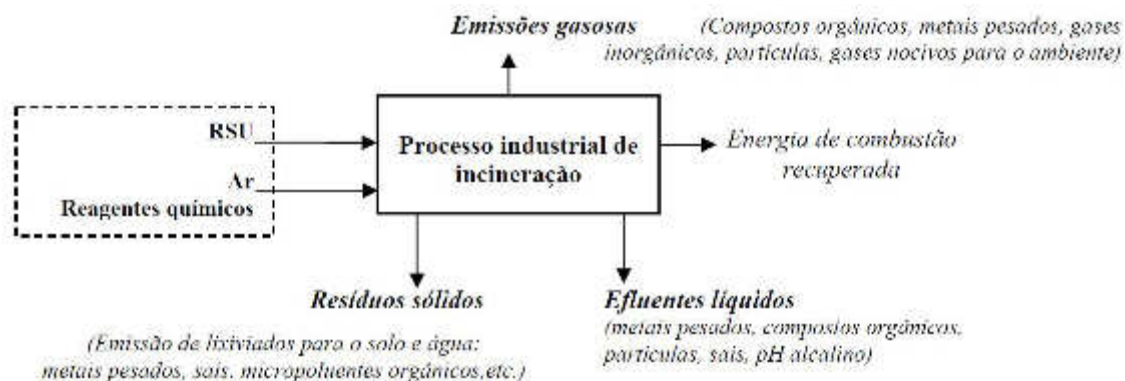
Normalmente, faz-se a limpeza dos tubos verticais através de vibração mecânica. A destruição térmica de compostos orgânicos ocorre sobretudo na zona da fornalha e pode ser um processo muito complexo. Podem ser necessários vários passos intermédios para que se garanta a oxidação completa de todas as cadeias longas de hidrocarbonetos presentes nos resíduos para a geração dos produtos de oxidação completa como H_2O e CO_2 , com exceção dos produtos clorados como o PVC, que ao passar pela zona de oxidação com excesso de oxigênio, ocasionará a formação de dioxinas, furanos e HCL. É fundamental que se adicione a quantidade adequada de O_2 e que o grau de agitação seja elevado para que o processo seja eficiente. De fato, existe uma intervalo ótimo de concentração de O_2 na queima dos resíduos, abaixo da qual há insuficiência estequiométrica, levando à produção de CO e acima da qual a temperatura de combustão decresce. O monitoramento da

concentração de CO e da temperatura permite avaliar a eficiência da combustão e proceder a ajustes de controle de forma adequada. Por outro lado, as elevadas temperaturas provocam a volatilização de compostos inorgânicos, os quais são em muitos casos extremamente nocivos para o meio ambiente. É o caso dos metais pesados, que se mantendo constantes em termos mássicos (não se produzem nem se destroem durante a incineração), podem ser alterados na sua forma química facilitando a passagem para a fase gasosa.

Apesar da exigência de sistemas de tratamento de gases, bem como de controle rígido dos parâmetros de operação dos incineradores, a eficiência de destruição e remoção de compostos orgânicos, dentre eles hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, dioxinas, furanos, bifenilas policloradas, além de metais pesados, ainda não chega a ser 100% (Martens *et al.*, 1998).

Após a combustão completa dos resíduos, a parte sólida restante denominada cinzas, é retirada da grelha por movimentos repetitivos ou extraída por uma rosca sem fim em incineradores de leito fluidizado. A quantidade deste material sólido após o processo de incineração varia de 12 a 30% em massa ou de 4 a 10% em volume do material original de entrada. Possui o aspecto de coloração cinza, sendo um material totalmente esterilizado e apto para ser destinado a aterros sanitários controlados ou mesmo aplicado à construção civil (tijolos, capeamento de estradas, etc.). Outro meio de descarte das cinzas são as fábricas de cimento onde as mesmas podem ser inseridas nos fornos de *clínquer* para substituição de matéria prima.

A Figura 7 mostra os fluxos de entradas e saídas de um processo industrial de incineração, com elevado impacto ambiental.



FONTES: IAWG, 1997.

Figura 7 – Fluxo de Entradas e Saídas

Apesar de haver inúmeras configurações possíveis para as instalações de incineração, estas podem ser classificadas em sistemas de:

- Combustão em grelha (*mass burning*): é a mais empregada para RSU no estado bruto permitindo operar com materiais com diversas granulometrias. Durante o deslocamento dos resíduos na grelha, o material vai sendo aquecido e passa por uma secagem, ocorrendo a perda de compostos orgânicos voláteis e a combustão do resíduo carbonáceo; cerca de 60% do ar de combustão pré-aquecido é introduzido por baixo da grelha, sendo o restante do ar introduzido sobre a grelha a alta velocidade para criação de uma região de elevada turbulência e promoção de sua mistura com os gases e vapores gerados durante a combustão.

- Leitos fluidizados tipos circulante ou borbulhante: são mais utilizados para lodo de esgoto; os resíduos, que devem estar triturados a diâmetro igual ou inferior a 2,5 cm, são incinerados em suspensão em leito de partículas inertes como areia e cinzas, insuflado com ar primário de combustão; exige maior complexidade operativa e ainda não alcançou seu pleno desenvolvimento comercial.

- Câmaras múltiplas: são adotadas geralmente para capacidades pequenas (0,2 a 200 t/dia), aplicável, por exemplo, a determinados grupos de resíduos de serviços de saúde; os resíduos são incinerados na grelha fixa da câmara primária e a pós-queima dos gases ocorre na câmara secundária; ocorre a geração de baixas pressões de vapor, não sendo recomendado para a geração de energia elétrica.

- Forno rotativo: é mais utilizado para resíduos industriais e quantidades de resíduos superiores a 24 t/dia.

Todos os processos de incineração, possuem vantagens inerentes quando comparado com outras formas de tratamento de RSU, das quais se destacam:

- Redução dos resíduos em cerca de 70% a 80% em massa e 90% em volume;
- Valorização energética, o que pode tornar os custos de operação muito baixos;
- Destruição dos agentes patogênicos;
- Destruição dos contaminantes orgânicos, não necessitando das lentas reações biológicas;

- As unidades de incineração podem ser construídas perto das grandes fontes de produção de RSU, reduzindo os custos de transporte;
- O controle das emissões gasosas, garantem os valores limites de emissão;
- Destruição em massa, sem necessidade de haver coleta seletiva ou pré-tratamento.

No entanto, a incineração apresenta também algumas desvantagens:

- Alguns materiais podiam ser mais valorizados por via da reciclagem. Interessa à incineração como aproveitamento energético as frações de RSU que apresentem elevado poder calorífico, como plásticos, papel/papelão e borrachas. Entretanto, os RSU no Brasil, possuem uma elevada fração de matéria orgânica a qual, devido à sua elevada umidade, apresenta baixo poder calorífico em relação a outros materiais. Isto pode resultar em resíduos misturados com carga térmica baixa, implicando numa baixa produção energética e consequente aumento do consumo de combustível auxiliar (Feam, 2012).
- Se as condições de operação não forem as mais adequadas e controladas, este processo pode ser uma fonte muito significativa de dioxinas e furanos e de metais como As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg; Os padrões de qualidade do ar estaduais de São Paulo, foram estabelecidos em 1976, pelo Decreto Estadual nº 8468/76, e os padrões nacionais foram estabelecidos pelo IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e aprovados pelo CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente, por meio da Resolução CONAMA nº 03/90.
- São produzidos resíduos sólidos considerados perigosos; Segundo Anon (*apud* GRIPP,1998), normalmente, a escória e a cinza são consideradas resíduos perigosos, principalmente as cinzas por possuírem maior concentração de metais pesados do que a escória.
- Alto custo de investimento e operação;
- Altos custos de manutenção, devido a corrosão dos feixes tubulares por ácidos formados no processo;
- Elevado consumo próprio de energia elétrica devido as altas potências instaladas nos sopradores, motores e exaustores utilizados no processo de alimentação, queima e limpeza dos gases. Isso deve-se aos grandes volumes de gases gerados na combustão por causa da utilização de excesso de ar que pode atingir a 50% da oxidação estequiométrica ($\lambda = 1,0$).

Desde 1989 a Comunidade Econômica Europeia (CEE) conta com duas Diretivas publicadas com o intuito de reduzir a poluição atmosférica provenientes das instalações de incineração de resíduos urbanos: a Diretiva n.º 89/369/CEE, de 08 de junho de 1989, trata das novas instalações e a Diretiva n.º 89/429/CEE, de 21 de junho de 1989, refere-se às instalações existentes. Nesses dois Atos da CEE, constam procedimentos de operação e critérios para controle das emissões poluentes de usinas de incineração de RSU.

O rendimento alcançável em uma usina térmica utilizando RSU como principal insumo, utilizando as mais modernas tecnologias existentes no mundo, está em torno de 22%, significando 0.5 MWh/ton de RSU processada. (Dr. K. D. Van der Linde – Amsterdam Waste & Energy Enterprise). A tecnologia atualmente disponível de projeto de incineradores pode prever a geração de até 0,75 MWh/t processada, utilizando ciclo combinado, ou seja, um aumento de eficiência de 22% para 33% utilizando como queima suplementar o gás natural. Abaixo na figura 8 demonstra a Usina em Bilbao – Espanha com capacidade de processamento de 792 ton. /dia de RSU.



FONTES: WTERT 2004.

Figura 8 – Usina de Bilbao – Espanha

Outras fontes também citam este rendimento de 0,769 MWh/tonenala Com a utilização de incineração de resíduo em usina termoeletrica de capacidade de 500 toneladas diárias de RSU e potência instalada de 16 MWe (TOLMASQUIM 2003). Já dados da EPA (EPA 2002) consideram que a incineração pode

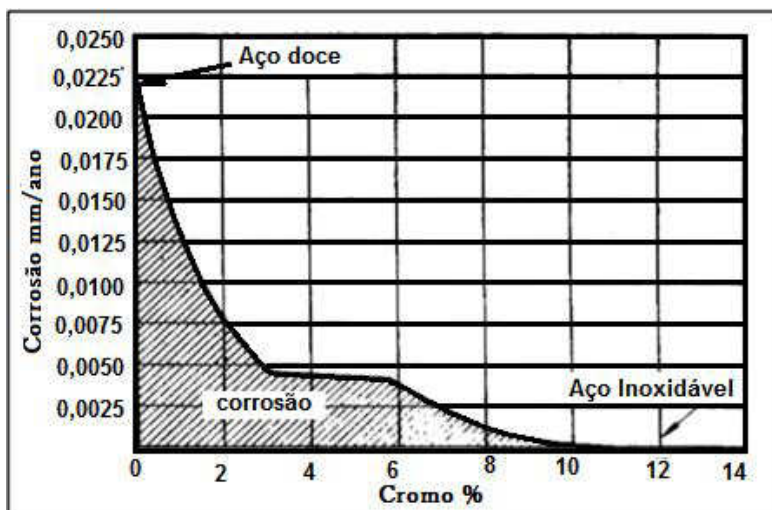
produzir até 0,550 MWh/tonelada de resíduo, e levando em conta que pode haver perdas na transmissão de até 5% do total produzido, este valor é de cerca de 0,523 MWh/tonelada. Todos estes valores de rendimento MWh/tonelada, como já mencionado, estão baseados no poder calorífico do resíduo sólido urbano utilizado, visto que este valor é alterado de região para região. Na Europa o PCI médio do lixo incinerado para “*Mass Burning*”, sem pré-processamento, é 2.400 kcal/kg, nos EUA 2.600 kcal/kg e no Brasil estimamos em 1.850 a 1980 kcal/kg (WTERT – 2005). Estudos de rendimento, devem ser realizados para a implantação da tecnologia de incineração no Brasil, visto que resíduo sólido nacional, possui em torno de 50% a 60% de umidade e é composto por 40% de matéria orgânica, diferentemente dos resíduos sólidos presentes nos países desenvolvidos. Esta composição ocasiona uma redução no poder calorífico inferior “in natura” do resíduo na ordem de 20% do resíduo europeu e 26,6% do resíduo americano, chegando a um PCI médio de 1908,14 kcal/kg (TAVARES, 2007).

Para uma usina no Brasil de 500 tonelada/dia de RSU com eficiência de 22% de transformação do RSU em MWe³, teríamos a seguinte geração: 500 ton/dia / 24 horas = 20,83 tonelada/h de RSU x 1908,14 kcal/kg x 1000 kg = 39.746.556,2 kcal/h / 860 (taxa de conversão de kcal para kWth) = 46.216,92 kWth/h. Com uma eficiência de 22% teremos 46.216,92 kWth/h x 0,22 = 10.161,72 kWe ou 10,16 Mwe. Ou seja, uma taxa de 0,48 MWh/tonelada de RSU.

Mas para o aumento da eficiência inevitavelmente passa pelo aumento da pressão e da temperatura do vapor da caldeira o que provoca o aumento da corrosão nos tubos do superaquecedor, o que cresce exponencialmente a partir de 400°C. Desta forma, a resistência à corrosão conforme demonstrada na figura 9, só é possível de duas maneiras, ambas inviáveis no Brasil devido aos altos custos de importação, visto que os materiais empregados nestas soluções não são encontrados no mercado nacional: introdução de caldeiras de inonel (aço inoxidável austenítico e as ligas de níquel com elevada resistência à corrosão, devido ao alto teor de cromo – Cr), ou outros materiais nobres, para resistir à corrosão causada pelos gases da queima do RSU como HCL (ácido

³ Dr. K. D. van der Linde – Amsterdam Waste & Energy Enterprise

clorídrico) e H_2SO_4 (ácido sulfúrico), ou com a introdução de ciclos combinados gás natural / RSU com grande consumo de gás.



FONTES: WTERT 2004.

Figura 9 – Contribuição do cromo- Cr na corrosão dos aços

Sendo assim, a incineração é mais um processo complementar ao aterramento do resíduo e aos outros programas de gerenciamento integrado dos RSU, chamada de Política ou Pedagogia dos 3 R, que inspira técnica e pedagogicamente os meios de enfrentamento da questão do lixo (LAYARGUES, 2002). A Política dos 3 R é um conjunto de medidas criadas para melhorar a gestão dos resíduos ambientais, que pressupõe a redução do uso de matérias-primas e energia e do desperdício nas fontes geradoras, a reutilização direta dos produtos e a reciclagem de materiais. A ordem entre os R também tem sua coerência: reduzindo-se, evita-se a reutilização e, reutilizando-se, evita-se a reciclagem. A Política dos 3 R faz parte da “Agenda 21”, documento com propostas para o desenvolvimento sustentável aprovado na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), em 1992, no Rio de Janeiro, também conhecida por ECO-92.

A incineração pode ser ambientalmente correta e aliada na proteção do meio ambiente, desde que estas plantas sejam operadas por equipes qualificadas e treinadas, e sejam monitoradas/acompanhadas pela comunidade e pelos agentes ambientais, públicos e privados.

2.6.2. Biogás de aterro sanitário

Aterro sanitário é um processo utilizado para a disposição de resíduos sólidos no solo, particularmente, resíduo domiciliar seguindo critérios de engenharia e

normas operacionais específicas, permitindo a confinação segura em termos de controle de poluição ambiental, proteção à saúde pública; ou, forma de disposição final de resíduos sólidos urbanos no solo, através de confinamento em camadas cobertas com material inerte, geralmente, solo, de acordo com normas operacionais específicas, e de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais (D' ALMEIDA & VILHENA, 2000).

Os aterros são a forma mais empregada no Brasil para destinação final dos RSU, principalmente pelo fato de necessitar baixo custo de investimento e operação barata e simplificada. Os RSU chegam ao aterro, em sua grande maioria, através de transporte rodoviário, diretamente do local onde foi coletado, ou oriundo de um ponto de separação de recicláveis. Passam primeiramente pelo sistema de pesagem que permite um acompanhamento do montante de resíduo aterrado. Em seguida os caminhões são encaminhados para descarregar os RSU no local onde estes serão aterrados, chamado de célula. As células de um aterro sanitário, conforme figura 10, devem ser revestidas por material impermeável, visando impedir a contaminação do solo. À medida que a capacidade de recebimento de cada célula é esgotada elas são seladas, possibilitando a captação do biogás (SEMPRETOPS, 2013, LANZINI 2013).



FONTE: Governo federal de Lavras 2013.

Figura 10 – Deposição dos RSU em células

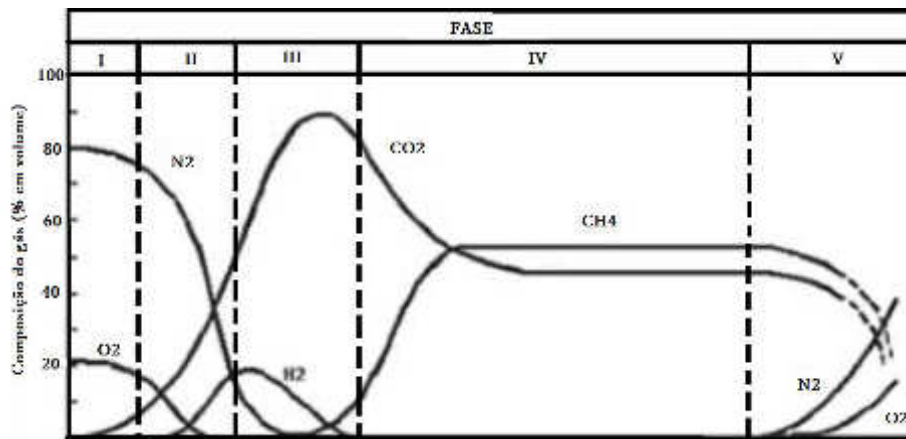
Com a decomposição da matéria orgânica nos aterros sanitários, à formação de um gás denominado de biogás. O mesmo é um recurso energético

renovável, que deriva da decomposição de matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos por bactérias em condições anaeróbicas, ou seja, na ausência de oxigênio. Sua constituição em volume é, em sua maioria, metano CH_4 com 40-55% e gás carbônico CO_2 com 30-45% e 5% de uma mistura de outros gases (hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, amônia, oxigênio e aminas voláteis) e cujo conteúdo energético gira em torno de 5.500 kcal por metro cúbico (ANEEL, 2005).

A obtenção do biogás é feita obedecendo a critérios de fermentação, temperatura, umidade, acidez e com a ausência de oxigênio. A forma natural do biogás é conseguida pela ação de micro-organismos bacteriológicos sobre o acúmulo de materiais orgânicos (Biomassa) como lixo doméstico, resíduos industriais vegetais, esterco de animais, entre outros. E a forma artificial é dada pelo uso de um reator químico-biológico chamado de Biodigestor Anaeróbico (ROYA, FREITAS, 2011).

Os fatores que podem influenciar na produção de biogás são: composição dos resíduos dispostos, umidade, tamanho das partículas, temperatura, pH, Idade dos resíduos, projeto do aterro e sua operação

A primeira fase, demonstrada na figura 11, a decomposição aeróbica, ocorre imediatamente depois do RSU ter sido destinado ao aterro, enquanto o oxigênio está presente dentro do resíduo. A decomposição aeróbica produz dióxido de carbono, água (chorume) e calor. O próximo estágio é a fase anaeróbica, sem a formação do metano em que compostos ácidos e gás hidrogênio são formados, enquanto há continuada produção de dióxido de carbono. A terceira fase é a instável formação do metano. Durante esta fase, a produção de dióxido de carbono começa a declinar porque a decomposição do RSU muda da decomposição aeróbica para a decomposição anaeróbica. A decomposição anaeróbica produz calor e água, mas, diferentemente, da decomposição aeróbica, também produz metano. Durante a quarta fase, o metano é gerado na faixa entre 40 e 70 por cento do volume total (McBEAM;ROVERS; FARQUHAR, 1995).



FONTE: Unesp, 2005.

Figura 11 – Produção dos componentes do biogás em relação ao tempo.

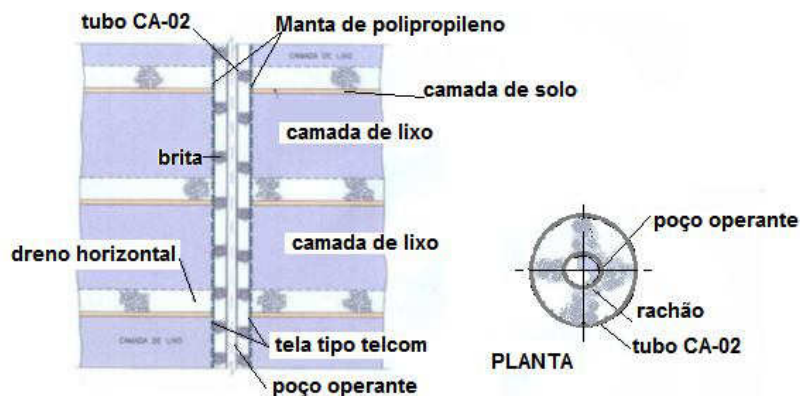
As bactérias que se encontram no lixo se proliferam, ocorrendo a fermentação e promovendo a liberação do biogás. Desta forma, nos aterros sanitários, há dutos que captam os gases liberados, que posteriormente, passam por processos de limpeza e desumidificação. Em seguida são pressurizados e queimados em “*flares*”, onde o metano (CH₄) é transformado em gás carbônico (CO₂) após sua queima, o qual possui um potencial de aquecimento global cerca de 25 vezes menor.

Existem diversos projetos de aproveitamento energético no Brasil, como nos aterros Bandeirantes e São João, no município de São Paulo, que já produzem energia elétrica da captação do metano, conforme figura 12. Por ser produzido em grande escala, o biogás também é usado como um combustível alternativo em relação ao gás natural proveniente da extração do petróleo, em caldeiras a vapor, veículos e moto-geradores para geração de energia elétrica.



FONTE: Ruthmann, 2013.

Figura 12 – Captação do metano em aterros sanitários.



FONTE: Delbin, 2004.

Figura 13 – Perfil Típico no Maciço Sanitário.

O processo de utilização do biogás de aterro possui alguns benefícios comparado a utilização do gás natural como;

- É um recurso energético renovável, pois a degradação de matéria orgânica é praticamente inesgotável. Assim, gera energia ecologicamente correta, diminuindo a utilização de recursos fósseis.
- Devido a presença de metano em sua composição o mesmo pode ser utilizado em caldeiras, veículos e em moto-geradores para a geração de energia elétrica. Já existe também uma tecnologia que permite usar esse gás para iluminar e aquecer áreas urbanas e rurais em que se combina utilização do biogás como matéria-prima principal juntamente com a automatização para acender e apagar os postes de iluminação.
- O biogás auxilia nessa questão do aquecimento global e reduz os efeitos causados principalmente para a população em torno do aterro.
- O resíduo formado da biodigestão é utilizado como fertilizante agrícola.
- Além disso, o biogás é, com certeza, uma importante fonte energética substituta para os combustíveis derivados do petróleo, como a gasolina e o diesel, por exemplo;

Por outro lado, como todo combustível, possui suas desvantagens a seguir:

- Por conta da alta concentração de gás metano em sua constituição, o biogás acaba também poluindo muito o meio ambiente, contribuindo diretamente para o efeito estufa e o aquecimento global. Por isso a necessidade da

transformação do metano em gás carbônico nos “*flares*”, como dito anteriormente.

- A quantidade de energia gerada pelo biogás não é constante, variando ao longo do período de produção;
- Em função da lei nº 12.305, de agosto de 2010 – Política nacional de Resíduos Sólidos, no futuro será minimizada a deposição de resíduos biodegradáveis em aterro sanitário, desta forma as instalações de recuperação de biogás terão um prazo tempo limitado de existência;
- Alto período de recuperação do investimento

2.6.3. Gaseificação de Resíduo Sólido Urbano

A gaseificação de RSU é a terceira vertente apresentada neste trabalho com finalidade de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos, na qual o produto final será um gás combustível para aproveitamento energético por meio de moto-geradores ou ciclo Rankine a vapor.

A mesma está dividida em três blocos distintos, porém, integrados e dependentes entre si, sendo eles;

1 - Unidade de recepção e produção de CDR – Combustível derivado de Resíduo: Trata-se de unidade composta por equipamentos que atuam no material recebido promovendo sua trituração, desumidificação e seleção mecânica, com ou sem auxílio de pessoas, produzindo um combustível homogêneo e específico para o gaseificador.

2 - Unidade de gaseificação: Trata-se do setor destinado a converter a energia potencialmente contida no CDR, em gás combustível de múltiplas aplicações.

3 - Unidade de geração de energia elétrica: Como uma das aplicações possíveis para o gás produzido na gaseificação, a geração de energia elétrica é a que possibilita o melhor aproveitamento energético e financeiro do mesmo. Atende dois modelos diferentes de geração: ciclo Otto e o ciclo Rankine; ou seja, o gás gerado poderá ser utilizado como combustível diretamente em moto-geradores, de ciclo Otto, onde a explosão interna aciona geradores acoplados. Ou, diretamente em combustores do tipo caldeiras aquatubular e turbo-geradores, acionados pelo vapor gerado pelo processo.

A melhor eficiência no aproveitamento energético está no ciclo Otto com 35%, mas sua viabilidade econômica é limitada a 2 MWe. Para a geração de potências superiores a 2 MWe, a utilização do ciclo Rankine com rendimento de 30%, torna-se a opção mais viável economicamente para a geração elétrica na utilização de gaseificadores, devido ao ganho de escala e consequentemente ao menor investimento R\$/MW instalado. (CARBOGAS, 2104).

2.6.3.1. O que é Gaseificação

O propósito deste item é mostrar aspectos básicos da visando à sua utilização em ciclos de potência. Porém, antes de iniciar essa discussão é conveniente analisar alguns aspectos que tornam a gaseificação uma tecnologia interessante para a geração de energia:

- A gaseificação é também chamada de combustão estagiada ou combustão incompleta, já que gás produzido será queimado numa etapa posterior (caldeira e motogeradores);
- A distribuição (transporte) é mais fácil; devido ao produto final ser um gás combustível, o mesmo pode ser transportado através de tubulações para grandes distancias, sem a necessidade da construção da usina no local de consumo.
- Controle facilitado;
- Combustão limpa, pois a grande parte das impurezas (material particulado) é removida do gás por ciclones;
- Combustão mais eficiente, facilidade na mistura ar-combustível, assim como no fornecimento da quantidade ideal de ar necessária para a queima do gás de síntese;
- Geração de energia: o gás produzido pode ser aplicado em ciclos de potência a ar, ou mesmo em ciclos combinados, com eficiência mais elevadas que aquelas conseguidas com a queima direta do combustível em ciclos Rankine;
- Há a possibilidade de síntese de compostos químicos: p.ex. nitrogênio para fertilizantes, diesel e combustíveis líquidos pelo processo Fisher Tropsch;

A gaseificação pode ser definida como oxidação parcial, à elevada temperatura 500 °C – 1400 °C e pressão variável (atmosférica a 33 bar), de material carbonáceo sólido ou semissólido (biomassa/madeira, resíduos, carvão, etc.),

em um gás combustível (gás de síntese, principalmente H₂, CH₄ e CO) (Morrin *et al.*, 2011; Hernández, Ballesteros e Aranda, 2013).

Durante a gaseificação, o produto principal é um gás combustível composto de CO, CO₂, H₂, CH₄, traços de hidrocarbonetos pesados, água, nitrogênio e várias outras substâncias - pequenas partículas de coque, cinza, alcatrão, ácidos e óleos, que são consideradas contaminantes (Bain, et al. 2002).

A composição desse gás de síntese varia em função do tipo de biomassa e do processo de utilizado. Os processos de gaseificação mais simples utilizam o ar como agente gaseificante, neste caso o uso de ar, ao invés de oxigênio, cujo o alto valor de mercado inviabiliza esta prática, pode reduzir o poder calorífico do produto gasoso devido à presença de dióxido de carbono e nitrogênio (Ahmed e Gupta, 2012).

O processo de gaseificação é composto por reações complexas, ainda não inteiramente conhecidas (Blasi, 2000; Cenbio, 2002; De Oliveira, 2008; Fonseca, 2009; Morrin *et al.*, 2011), porém pode ser simplificado em três etapas principais: a etapa de secagem, a etapa de pirólise e a etapa de gaseificação, em que ocorre a oxidação parcial dos resíduos e gases voláteis produzidos na etapa de pirólise (Anis e Zainal, 2011).

As principais reações conhecidas da gaseificação que ocorrem em um reator são:

1 – C (sólido) + O₂ (gás) $\rightleftharpoons$ CO₂ (gás) (reação de combustão, formação de dióxido de carbono). Reação exotérmica.

2 – C (sólido) + ½ O₂(gás) $\rightleftharpoons$ CO (gás) (combustão parcial, formação de monóxido de carbono). Reação exotérmica.

3 – C (sólido) + H₂O (gás) $\rightleftharpoons$ CO (gás) + H₂(gás) (reação gás-água "fase 1"). Reação endotérmica.

4 – CO (gás) + H₂O (gás) $\rightleftharpoons$ CO₂ (gás) + H₂(gás) (reação gás - água "fase 2"). Reação exotérmica.

5 - H₂ (gás) + ½ O₂(gás) $\rightleftharpoons$ H₂O (gás) (reação de formação de vapor de água). Reação exotérmica.

6 – C (sólido) + CO₂ (gás) $\rightleftharpoons$ 2 CO (gás) (reação de Boudouard). Reação endotérmica.

7 – C (sólido) + 2 H₂(gás) <=> CH₄ (gás) (reação de metanização 1). Reação exotérmica.

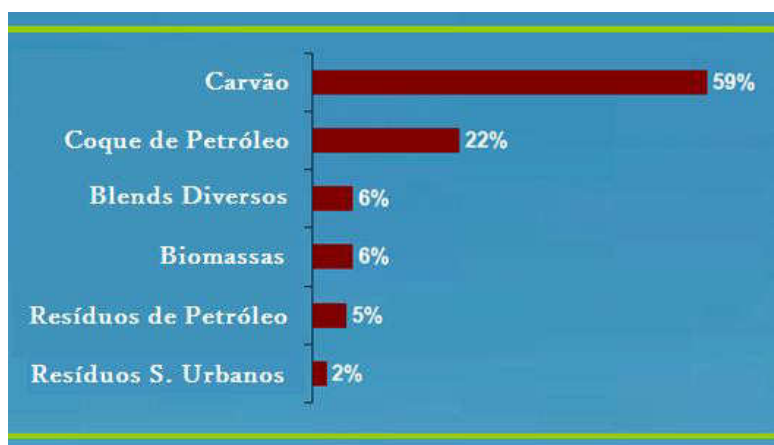
8 – CO (gás) + 3 H₂(gás) <=> CH₄ (gás) + H₂O (gás) (reação de metanização 2). Reação exotérmica.

De maneira geral, a composição média o gás de síntese para utilização em diversos fins, segue a tabela 3, conforme NOGUEIRA, 2003.

Tabela 2 – Composição média do gás de síntese, poder calorífico e qualidade do gás de síntese. Fonte Nogueira, 2003.

Tipo de gaseificador		Agente gaseificante	Composição média do gás de síntese (%)					Poder calorífico (MJ/Nm ³)	Qualidade do gás	
			H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂		Alcatrão	Particulados
Leito fixo	Co-corrente	Air	17	21	13	1	48	5,7	Boa	Mediana
	Co-corrente	O ₂	32	48	15	2	3	10,4	Boa	Boa
	Contracorrente	Air	11	24	9	3	53	5,5	Baixa	Boa
Leito fluidizado		Air	9	14	20	7	50	5,4	Mediana	Baixa

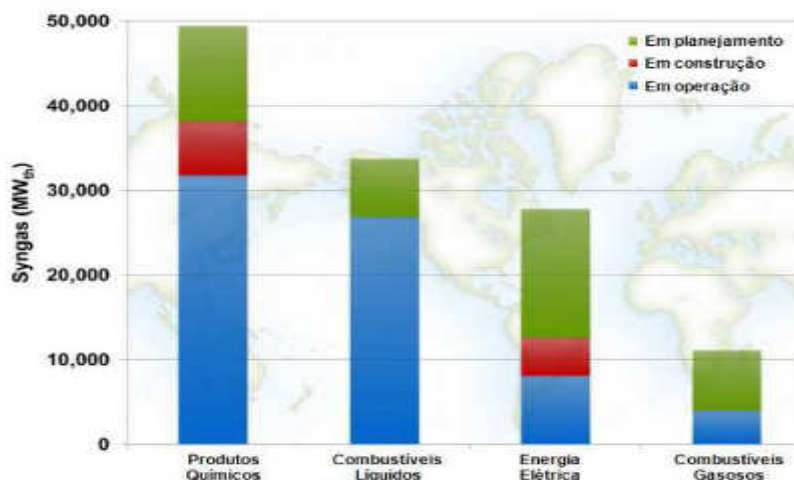
A gaseificação, apesar de ser conhecida mundialmente há muitas décadas, ainda é pouco utilizada com resíduos sólidos urbanos. A figura 14, mostra que segundo Conselho de Tecnologia em gaseificação, o principal combustível utilizado na gaseificação industrial é o carvão, com 59% das plantas instaladas, seguido pelo coque de petróleo o qual é utilizado em 22% das plantas instaladas. O resíduo sólido urbano aparece em último como utilização em projetos de gaseificação, com apenas 2% de plantas instaladas. Isso demonstra o grande potencial de desenvolvimento que a gaseificação poderá passar com a utilização deste combustível alternativo.



FONTE: Gasification Technologies Council, 2013.

Figura 14 – Matriz Mundial de Gaseificação por combustível.

Em relação ao produto final indicado na figura 15, a geração de energia elétrica encontra-se em terceiro lugar, atrás de produtos químicos e combustíveis líquidos. Porém, segundo NETL (2012), a utilização da tecnologia de gaseificação para geração de energia elétrica é a que mais irá crescer nos próximos anos. (Soares, 2012)



FONTE: NETL,2012.

Figura 15 – Capacidade Mundial de Geração de Gás de Síntese

2.6.3.2. Modelos de Gaseificadores

Segundo Cortez, Lora e Gómez (2009), os gaseificadores podem ser classificados de acordo com o poder calorífico do gás produzido, tipo de agente gaseificador, tipo de leito, pressão de trabalho e tipo de combustível.

Tabela 3 – Características dos gaseificadores

Fonte: Adaptado de CORTEZ, LORA E GOMEZ (2009) E HERNQUES (2004).

Características	Variações
Poder Calorífico do Gás Produzido	Baixo: até 5 MJ/Nm³ (997 kcal/kg)
	Médio: 5 a 10 MJ/Nm³ (997 a 1.993 kcal/kg)
	Alto: 10 a 40 MJ/Nm³ (1.993 a 7.972 kcal/kg)
Tipo de agente gaseificador	Ar, vapor d'água, oxigênio, hidrogênio
Tipo de leito	Fixo: corrente paralela ou contracorrente
	Fluidizado: borbulhante ou circular
Pressão de trabalho	Baixa: pressão atmosférica
	Pressurizado: até 6 Mpa (59,2 atm)
Natureza da biomassa	Resíduos agrícolas, industriais ou sólidos urbanos
	Biomassa <i>in natura</i> , peletizada ou pulverizada

Dentre os diversos tipos de gaseificadores destacam-se principalmente os modelos de leito fixo (*Fixed Bed Gasifier*), leito fluidizado (*Fluidized Bed Gasifier*) e leito de arrasto (*Entrained Flow Gasifier*) (NETL, 2012).

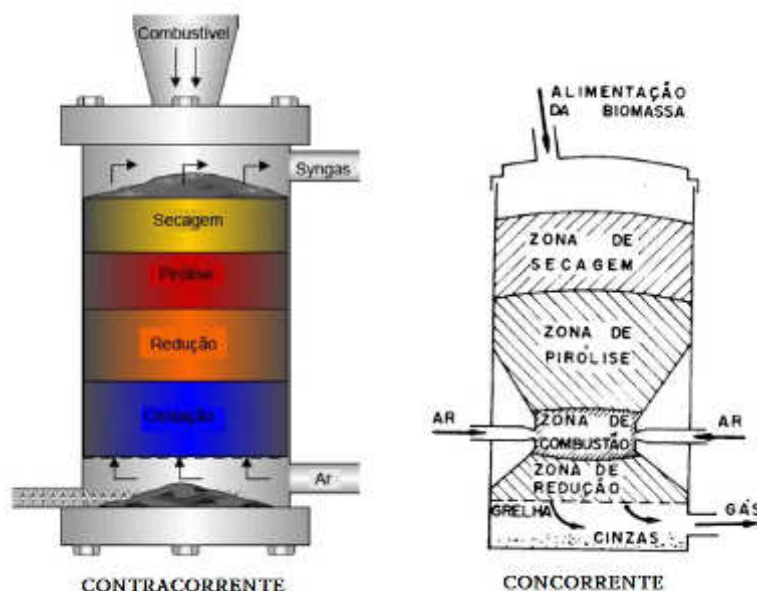
1 – Leito Fixo – A denominação de “leito fixo” é devido à camada de produto a ser gaseificado estar suportada dentro do gaseificador por grelhas fixas e apresentando sua espessura mais ou menos constante. Dentro deste leito, o produto move-se vagarosamente, de cima para baixo, passando por várias zonas distintas, saindo finalmente um resíduo, as cinzas, pelo fundo. Os agentes de gaseificação (vapor e ar, O₂ e outros), circulam, geralmente, em contracorrente, de baixo para cima, neste caso, temos o chamado fluxo em contracorrente ou “*updraft*”, ou de cima para baixo, ou seja, a favor do fluxo do combustível, chamado de concorrentes ou “*downdraft*”. Os mesmos estão demonstrados na figura 16.

Segundo Cortez; Lora e Gomez (2011) os gaseificadores contracorrentes, tendem a ter uma eficiência térmica alta, devido aos gases provenientes da região de combustão pré-aquecerem o combustível que será utilizado. Porém, possuem a desvantagem de produzirem um gás extremamente carregado principalmente de alcatrão, devido ao fato de os produtos resultantes da volatilização da biomassa (etapa da pirólise) não serem craqueados na zona de combustão (SOARES 2012).

Apesar de esse equipamento poder ser utilizado com uma larga escala de combustíveis (biomassa, resíduos municipais, etc), deve-se ressaltar que pelo fato do gás gerado possuir grandes quantidades de alcatrão pode impedir sua utilização em motores de combustão interna, limitando seu uso principalmente à queima direta em fornos e caldeiras. Outro limitante deste processo é a granulometria utilizado do combustível. Ou seja, por ser suportado por uma grelha fixa, e o ar passar entre os espaços criados pela deposição do combustível, a granulometria não poderá ser heterogênea, pois a falta de homogeneidade pode causar “abafamento” do leito, caminhos preferenciais os quais prejudicam o rendimento final de gaseificação ou até mesmo o apagamento do leito (CARBOGAS 2014).

Entretanto os gaseificadores concorrentes, lhe permite uma produção de gás livre de alcatrão, pois os voláteis provenientes da zona de pirólise, são destinados para a zona de oxidação onde o alcatrão é craqueado. Porém,

partículas de cinzas e fuligem são arrastadas juntamente com o gás. A temperatura de saída dos gases também tende a ser maior (700 °C), pois não trocam calor diretamente com as zonas de pirólise e secagem, dificultando sua limpeza posterior (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2011).



FONTE: Adaptado de Pagliuso. 2009

Figura 16 – Gaseificadores de leito fixo – Contracorrente e Concorrente.

A seguir, serão listadas as 4 (quatro) etapas principais do processo de gaseificação de leito fixo, que poderão ser seguidos pela figura 17.

Secagem – evaporação da umidade presente no combustível, esta etapa pode ser descartada caso o combustível já entre no reator a baixa umidade (~8-15%);

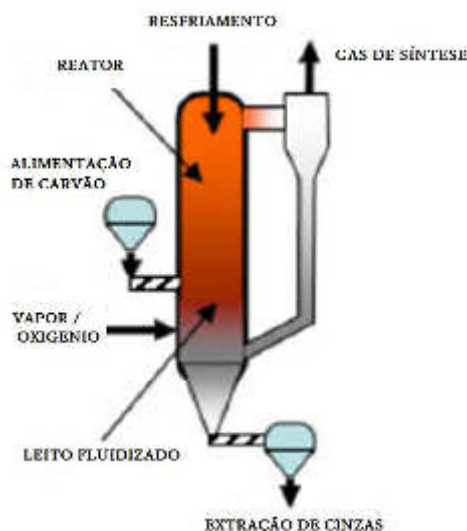
Pirólise – através do aumento de temperatura (~500°C), ocorrendo a formação do alcatrão e produtos gasosos (CO, CO₂, H₂, CH₄, C₂H₄, dentre outros);

Redução dos componentes formados na Pirólise (carvão, óleos, entre outros) – nesta etapa reações fortemente endotérmicas acontecem, e também é nesta etapa que há a formação do metano;

Oxidação (Combustão parcial) do combustível por um agente oxidante (ar ou oxigênio puro) – esta etapa é responsável pelo fornecimento de calor necessário para as demais, onde as reações de transformação ocorrem;

Gaseificadores de leito fixo representam a maior parte dos equipamentos em operação ou em construção no mundo, representando cerca 77,5% dos projetos de gaseificadores (Henriques, 2009).

2 – Leito Arrastado (leito de arraste) – Para este tipo de gaseificador as partículas do combustível precisam ser muito finas (pulverizado) e são gaseificadas na presença de oxigênio (com muito menos frequência usa-se ar) em fluxo co-corrente. A maioria dos carvões podem ser gaseificados neste tipo de equipamento devido a sua elevada temperatura de operação que funde o carvão e as cinzas, além de proporcionar excelente separação das partículas de carvão dentro do leito evitando aglomeração. Em contrapartida está elevada temperatura impõe um resfriamento dos gases de saída antes de sua limpeza devido a limitações técnicas destes equipamentos atualmente. A figura 17, mostra um esquema de um gaseificador de leito de arraste, onde pode ser observado o ciclone externo, o qual faz a separação do gás de síntese com o particulado existente.



FONTE: NETL 2012.

Figura 17– Gaseificador de leito de arraste.

3 – Leito Fluidizado – A gaseificação em “leito fluidizado” requer uma alimentação de oxigênio (ou ar) e vapor pressurizado por baixo da tela da câmara de combustão vertical, sendo que o combustível é alimentado por cima, assim o oxigênio e o vapor mantém o combustível triturado/moído em suspensão (fluidizado) em constante ebulição para controle da combustão. No processo em leito fluidizado a velocidade dos gases é aquela necessária apenas para processamento das reações, mesmo que não seja suficiente ao arraste das partículas existentes no leito de areia.

A fluidização baseia-se fundamentalmente na circulação de sólidos juntamente com um fluido (gás ou líquido) impedindo a existência de gradientes de temperatura, de pontos muito ativos ou de regiões estagnadas no leito; proporcionando também um maior contato superficial entre sólido e fluido, favorecendo a transferência de massa e calor.

A eficiência na utilização de um leito fluidizado, conforme figura 18, depende em primeiro lugar do conhecimento da velocidade mínima de fluidização. Abaixo desta velocidade o leito não fluidiza; e muito acima dela, os sólidos são carregados para fora do leito.



FONTE: Adaptado de Pagliuso. 2009

Figura 18 – Comportamento do leito fluidizado x velocidade do gás.

Segundo Cortez; Lora e Gomez (2011) nos gaseificadores de leito fluidizado, as partículas do combustível são mantidas suspensas em um leito de partículas inertes (areia, cinzas ou alumina) fluidizadas pelo fluxo de ar que é suportado por um distribuidor fixo, criando melhores condições de transferência de calor e homogeneidade da temperatura na câmara de reação. Nestas condições a maioria dos voláteis estará em contato com as partículas do leito aquecido, contribuindo para uma gaseificação possivelmente completa e limpa. Isto significa que as interações entre fluidos e partículas se dão com maior intensidade e o processo de gaseificação é mais completo

Os gaseificadores de leito fluidizado são classificados em borbulhante ou circulante. Um gaseificador com leito fluidizado borbulhante consiste em um recipiente com uma grelha ou distribuidor ao fundo pelo qual o ar é introduzido, assim uma corrente de gás com sentido ascendente atravessa a grelha atingindo um leito de materiais de fina granulação onde se encontra a biomassa (GEROSA, 2012). Segundo Nogueira (2009), o gás produzido possui baixa velocidade (menor que 3 m/s) e o sólido não é arrastado pelo gás. Abaixo a

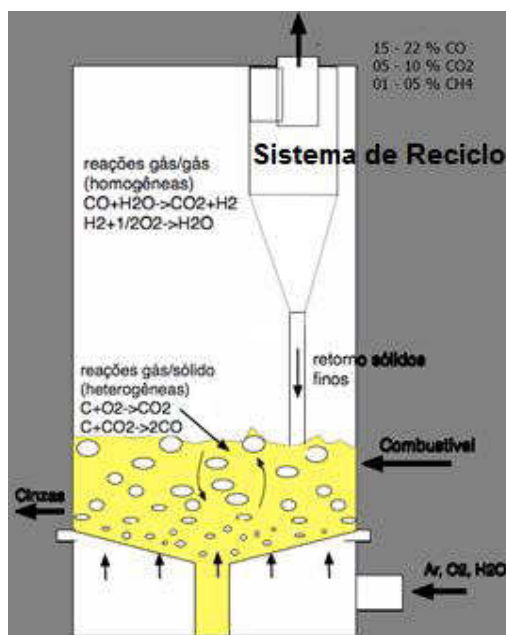
figura 19, demonstra uma grelha ou distribuidor de um gaseificador de leito fluidizado.



FONTE: Carbogas 2009

Figura 19 – Distribuidor do leito fluidizado.

Gaseificadores de leito fluidizado circulante diferem-se do leito borbulhante pelo fato de não haver uma separação bem definida entre a zona de sólidos densos e a zona de sólidos diluídos (CALLE, 2005). Segundo Nogueira (2009) o gás possui velocidade moderada (de 3 a 6 m/s), onde as partículas grandes não são arrastadas e as pequenas sim, onde há um sistema de reciclo conforme figura 20, onde os sólidos são separados do gás e levados de volta ao leito.



FONTE: Carbogas 2009

Figura 20 – Gaseificador de leito fluidizado circulante.

A principal importância do gaseificador em leito fluidizado, é que o mesmo pode processar uma variedade muito grande de materiais, e essa gaseificação é total e não parcial como em outros gaseificadores, efetuando a totalidade das reações químicas previstas, sem sobra de resíduos prejudiciais ao meio ambiente e ao homem. Dentre outras características, a gaseificação em leito fluidizado em comparação a gaseificação em leito fixo, demonstra maior tolerância à umidade presente no combustível, não necessidade de preocupação com o grau de inchamento bem como a granulometria do produto utilizado, podendo ser utilizados combustíveis líquidos ou pastosos no processo.

A gaseificação em leito fluidizado se apresenta bastante promissora. Este fato se deve principalmente à possibilidade de utilização de combustíveis como bagaço de cana, casca-de-arroz, resíduos sólidos urbanos e industriais e etc, vantajosos pelos baixos preços de comercialização e grande disponibilidade. Mas principalmente, estes biocombustíveis são de difícil gaseificação por métodos tradicionais como leito fixo, devido às suas características de umidade, granulometria, baixa densidade, dentre outras, sendo a fluidificação a solução para o aproveitamento energético destes insumos.

Tabela 4 – Comparação entre os diferentes tipos de gaseificadores.

Fonte: NTEL 2012.

REGIME DE FLUXO	LEITO FIXO OU MÓVEL	LEITO FLUIDIZADO	LEITO ARRASTADO
Analogia a combustão	Combustor por grade	Combustor por leito fluidizado	Combustor de carvão pulverizado
Tipo de Combustível	Somente sólido	Somente sólido	Sólidos Pulverizados ou Líquidos
Tamanho do combustível	20 – 50 mm	0,5 – 5 mm	< 500 microns
Tempo de Residência	15 – 30 minutos	5 – 50 segundos	1 – 10 segundos
Oxidante	Ar ou oxigênio	Ar ou oxigênio	Quase sempre oxigênio
Temp. do gás de saída	400 – 500 °C	700 – 900 °C	900 – 1400 °C

Exemplos comerciais	Lurgi dry-ash (non-slugging), BGL (slagging).	IGT U-Gas, HT Winkler, KRW, Carbogas.	GE (Texaco), Shell, Prenflo, E-Gas, Noell
Comentários	Leito móvel é mecanicamente agitado, o leito fixo não.	Temperatura do leito está abaixo do ponto de fusão da escória, prevenindo aglomeração das partículas.	Não recomendável para carvão com elevada quantidade de cinzas, devido à elevada temperatura que promove a fusão da escória.
	Para o gaseificador em leito móvel o fluxo é sempre em contra-corrente	Sugerido para carvão com elevada quantidade de cinzas e também para gaseificação de rejeitos em geral.	Não recomendável para combustíveis de difícil atomização e pulverização.

As diferentes tecnologias dos gaseificadores influenciam diretamente em seu tamanho final. Na figura 21, IRENA (2012) classifica de forma simples os gaseificadores por porte, em MW (Soares 2012).



FONTE: Adaptado de IRENA, 2012

Figura 21 – Classificação dos Gaseificadores por Tamanho.

2.6.3.3. Planta em Leito Fluidizado em Escala Industrial.

Fundada em 1.976 a Carbogas Ltda, teve como principal foco a fabricação de gaseificadores de leito fixo em escala industrial para carvão mineral e turfa destinados aos segmentos cerâmicos, mineração e cimenteiras.

Com a expansão no mercado, verificou-se um inconveniente encontrado nos gaseificadores de leito fixo existentes os quais não gaseificam uma vasta gama de combustíveis orgânicos, ou seja, utilizam apenas alguns materiais, tais como carvão e cavaco de madeira com granulometria pré-determinada. Outro

inconveniente é que os gaseificadores de leito fixo, não produzem a totalidade da gaseificação do combustível, ou seja, há sobra de resíduos do processo de pirólise dentro do reator, de forma que nem todas as reações químicas são atendidas. Tal condição de pirólise parcial, acarreta sobra de compostos como alcatrões, ácidos e aldeídos muitas vezes tóxicos e nocivos ao meio ambiente. A figura 22, demonstra um gaseificador de leito fixo em atendimento a uma indústria cerâmica utilizando o carvão mineral.



FONTE: Carbogas, 2004

Figura 22 – Gaseificador de leito fixo de carvão mineral – 6 MWth – Cerâmica Cecrisa.

As necessidades em se obter um gaseificador com alto rendimento no processo de pirólise, seja este de qualquer natureza orgânica, de forma a não produzir resíduos nocivos ao meio ambiente, levaram a estudos e a construção de uma planta piloto em escala semi-industrial para desenvolvimento de um processo de leito fluidizado circulante, o qual foi concebido um gaseificador de estrutura cilíndrica em aço inoxidável revestida internamente com material de baixa condutividade térmica, onde cria um volante térmico para gaseificação de materiais carbonosos diversos, sendo que no interior também ostenta, uma série de sistemas para ativar o fluxo ascendente e descendente de gases e material particulado em elevada temperatura (850°C), a fim de que todas as reações químicas de uma extensa cadeia se realizem. Em seu interior é instalado ciclones especialmente projetados que propiciam a reciclagem de

carbonos não convertidos e ainda aumenta de maneira substancial o craqueamento de alcatrões carregados pelo gás no processo de pirolise. O gaseificador atua em conjunto com vários outros dispositivos de fornecimento automático de matéria prima, válvulas de filtragens, multiciclones, entre outros itens de suporte.

Assim, visando o aprimoramento da tecnologia e a obtenção de um processo associado a um equipamento de gaseificação, com menor número de componentes possíveis, convenientemente configurados e arranjados para desempenhar suas funções com eficiência e versatilidade, sem os inconvenientes já mencionados, a Carbogas Ltda desenvolveu uma planta de gaseificação em leito fluidizado para resíduos sólidos urbanos, o qual desenvolve testes de desempenho e queima do gás de síntese conforme figura 23 e 24. A planta piloto está localizada nas dependências da empresa no município de Mauá-SP.



FONTE: Carbogas, 2009

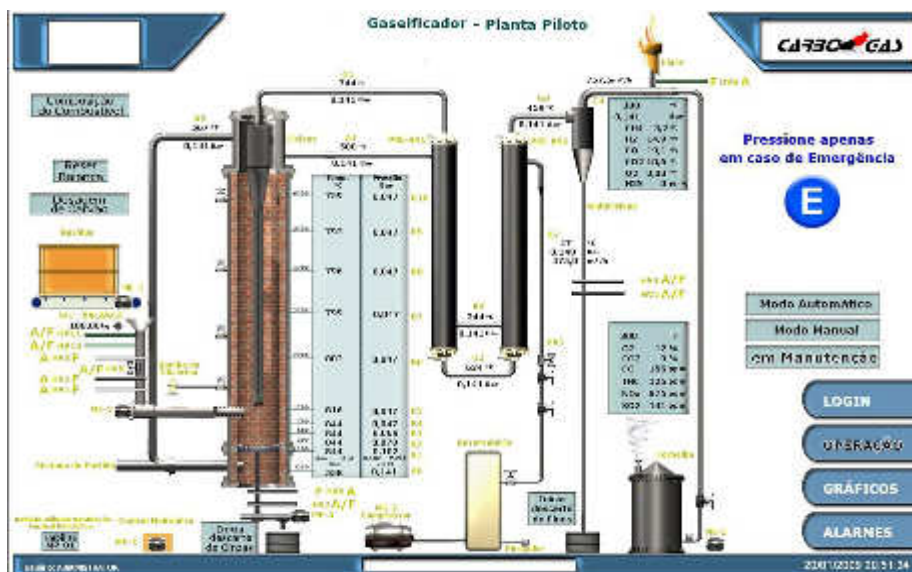
Figura 23 – Vista Externa da Planta Piloto em Mauá-SP.



FONTE: Carbogas, 2009

Figura 24 – Vista Interna da Planta Piloto em Mauá-SP.

Conforme a figura 25, a planta piloto de Mauá-SP conta com uma potência térmica instalada de 1 MWth, geração de 741 Nm³/h de gás combustível com PCI de 1160 kcal/Nm³ e consumo de até 325 kg/h de resíduo com PCI de 3500 kcal/kg. A planta possui 2 sopradores de ar de processo, 2 trocadores de calor, silo, sistema de alimentação, sistema de extração de cinzas, sistema de limpeza dos gases, flare, termopares, transdutores de pressão e outros periféricos pertinentes ao processo. Sua alimentação e controles de temperatura e pressão, são realizados por “software” dedicado e específico, o qual corrige por padrões algoritmos de PID – proporcional, integral e derivada.



FONTE: Carbogas, 2009.

Figura 25 – Fluxograma de processo.



FONTE: Carbogas, 2012

Figura 26 – Sistema de Extração de Cinzas e Alimentação.

Por se tratar de um reator contendo no seu interior gases combustíveis em alta temperatura, pressurizado e que não podem ter contato com o meio ambiente, um sistema de alimentação composto por válvulas hidráulicas especialmente projetadas, conforme figura 26, permitem a alimentação do reator sem que haja escapes de gases para o ambiente.



FONTE: Carbogas, 2014

Figura 27 – Sistema de Supervisório.

A cadência do funcionamento das válvulas do sistema de alimentação, cujo dimensionamento é de exclusividade para cada reator, é realizada por um “software” interligado com um sistema supervisório indicado na figura 27. Este controle da alimentação do reator, deve estar em sintonia com a produção de gás, sendo menor ou maior o fluxo de combustível, considerando em especial, sua umidade, densidade e poder calorífico.

Para o aproveitamento dos gases de síntese, a planta piloto possui a possibilidade de consumi-lo de 3 formas independentes ou simultâneas sendo:

fornalha de combustão dos gases de síntese, “*flare*” e um moto-gerador de capacidade de 180 kWh de energia elétrica indicados na figura 28.



FONTE: Carbogas, 2014

Figura 28 – Moto gerador 180 kW, Fornalha e “Flare”.

Tendo em vista a ausência de O_2 no processo de gaseificação, não há formação de componentes tóxicos como NO_x , SO_x , dioxinas ou furanos. Dioxinas e furanos são compostos poli-clorados cujo núcleo central é formado por dois anéis de benzeno ligados por um ou dois átomos de oxigênio que formam um terceiro anel central. As dioxinas e furanos provêm essencialmente de processos químicos industriais e processos térmicos (de combustão) especialmente quando estão envolvidas temperaturas baixas, entre 250º-500ºC, que favorecem a sua formação (Chang & Huang, 2000).

2.7. Considerações Preliminares

Baseado no que foi apresentado entre as três metodologias de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos, será apresentado na tabela 5 de forma preliminar suas características, vantagens e desvantagens, fundamentada na mesma base comparativa de dados, ou seja, a mesma capacidade de destinação dos resíduos dia. Serão comparados investimentos, rendimentos, geração de energia e etc.

Existem várias tecnologias de incineração em desenvolvimento e destinadas ao tratamento, por via térmica, de resíduos sólidos: incinerador de leito fixo, leito fluidizado, pirolítico, tambor rotativo, entre outros. De todas elas, a que conta com a maior experiência de aplicação e está disponível comercialmente no Brasil e em outras partes do mundo, é o denominado “*mass burn*”, desta forma o mesmo será objeto deste estudo. O mesmo acontece com os gaseificadores destinados a o tratamento de resíduos sólidos, que atualmente

a tecnologia mais adequada e disponível no Brasil, é o leito fluidizado circulante.

Tabela 5 – Comparativo entre tecnologias

Fonte: Revista Brasileira de Energia-2008, Carbogas 2014.

INCINERAÇÃO- <i>Mass Burn</i>	BIOGAS DE ATERRO	GASEIFICAÇÃO L.F.C
VANTAGENS		
Reduz 70 – 75% da massa e cerca de 90% do volume dos RSU; Incentiva a triagem e reciclagem de materiais, uma vez que alguns deles não podem ser inseridos no incinerador; Não exige grandes áreas como o aterro, apenas a área da usina; Não há formação de chorume; Elimina emissões de CH₄; Gera significativa quantidade de energia elétrica, reduzindo a queima de combustíveis fósseis em termelétricas; Destruição de patógenos existentes nos resíduos; Cinzas inertes; Otimiza a logística de transporte;	Não há a necessidade de processamento dos resíduos para seu recebimento, ou seja, o recebimento é “in natura”; Geração do biogás que pode ser capturado e aproveitado; A emissão de carbono é distribuída no tempo, uma vez que o ciclo de vida de um aterro é de em média 40 anos; Dispõem o RSU de maneira adequada ambientalmente; Rendimento direto de transformação em energia elétrica de 34%; Substituto de combustíveis fósseis; Domínio da tecnologia para construção e manutenção;	Reduz 75-85 % da massa e cerca de 90% do volume do RSU; Incentiva a triagem e reciclagem de materiais, uma vez que alguns deles não podem ser inseridos no gaseificador; Não exige grandes áreas como o aterro, apenas a área da usina; Não há formação de chorume; Elimina emissões de CH₄; Gera significativa quantidade de energia elétrica, reduzindo a queima de combustíveis fósseis em termelétricas. Produção de gases que podem ser consumidos longe do local de geração (transportados por dutos); Possibilidade de geração de combustíveis líquidos pelo processo de Fisher Tropsch; Baixo custo de investimento-de implementação; Não há formação de dioxinas e furanos; Não há formação de NO_x, SO_x Possibilidade de abatimento do enxofre no leito com CaCO₃; Baixas potências elétricas instaladas nos motores e sopradores instaladas para o

		processo de gaseificação, devido aos baixos volumes de gases; Tecnologia nacional; Destruição de patógenos existentes nos resíduos; Passível de ser utilizado em motores de combustão interna; Cinzas inertes; Plantas modulares; Atendimento aos municípios de baixa geração de RSU;
DESVANTAGENS		
Necessita de tratamento do resíduo urbano para retirada de metais, vidro, abatimento de umidade antes do envio ao incinerador; Emite grande quantidade de CO₂ nas chaminés; Pode emitir poluentes como CO, SO_x, NO_x, material particulado, dioxinas e furanos caso medidas mitigadoras não sejam tomadas; Rendimento global de transformação em energia elétrica de 22%; Alto custo de investimento – Capex e manutenção – Opex; Geração de energia elétrica apenas local por ciclo Rankine; Corrosão dos feixes tubulares da caldeira pelo HCL presente no resíduo	Exige grandes áreas para implementação; Impossibilita o uso da área por muito anos após o seu fechamento; Exige topografia adequada; Provoca grande movimentação de terra e resíduo; Gera menor quantidade de energia elétrica ao longo do tempo; Exige cuidados e manutenção por pelo menos 30 anos após sua saturação; Dificuldades de replicação devido as licenças ambientais e indisponibilidade de áreas; Emissor de CH₄ para atmosfera, visto que não há possibilidade de captação de todo o biogás; Gerador de patógenos e pragas ao redor do aterro; Rendimento Global de Geração de biogás e geração de energia elétrica de 9%;	Necessita de tratamento do resíduo urbano para retirada de metais, vidro, abatimento de umidade antes do envio ao gaseificador; Pode emitir poluentes como CO, CH₄ e material particulado, caso medidas mitigadoras não sejam tomadas; Rendimento global de transformação em energia elétrica de 22%; Consumo “on line”, não havendo a possibilidade de envasamento do gás a alta pressão; Gás de baixo poder calorífico; Efeito escala para plantas acima de 50 MWth; Necessidade de contratos de longo prazo de fornecimento de resíduos para utilização da capacidade da Usina; Monitoramento e operação por pessoal especializado;

Altas potências elétricas instaladas nos motores e sopradores devido aos grandes volumes de gases – excesso de oxigênio Tecnologia Importada; Necessita de grandes quantidades diárias de resíduos; Necessidade de contratos de longo prazo de fornecimento de resíduos para utilização da capacidade da Usina; Necessidade mínima de 500 ton/dia;	Desperdiça uma valiosa fonte de energia; Fortes odores e barulho, atraindo aves e outros animais que se alimentam do próprio lixo; Deteriora permanentemente o solo utilizado e as vizinhanças; Baixa redução do volume; Após a retirada do biogás, ainda há sobra de resíduos; Lei 12.305 de Agosto de 2010. Custos elevados de Instalação e manutenção dos moto-geradores;	
---	---	--

3- ESTUDO ECONÔMICO

Abaixo segue uma descrição não exaustiva das tecnologias e as premissas consideradas para a elaboração do modelo econômico-financeiro.

As três tecnológicas de tratamento do RSU – baseadas em incinerador “*mass burn*”, biogás de aterro e gaseificação em leito fluidizado circulante, serão analisadas segundo um cenário idealizado, compatível com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Serão analisados a *performance* econômico-financeira, as contribuições para a redução das emissões de GEE – Gases de Efeito Estufa e o aumento da eficiência energética, os empregos diretos gerados e a conformidade às exigências legais.

A análise econômico-financeira será obtida para três empreendimentos para atender a oferta de 2.000 toneladas diárias de RSU. Os empreendimentos serão avaliados por meio do cálculo de seu fluxo de caixa descontado, segundo taxas de desconto de 12% ao ano, para 20 anos de operação.

Os impostos utilizados para a avaliação financeira são aqueles informados pela Receita Federal. Não há muitas premissas para serem elaboradas neste aspecto do estudo. Porém, no caso do ISS – Imposto Sobre Serviço foi necessário utilizar uma hipótese: como o ISS é uma taxa municipal, e o município que irá abrigar a infraestrutura de tratamento de RSU ainda não foi definido, o ISS foi considerado como sendo 5%. Como a taxa varia tipicamente entre 0% a 5%, foi considerado o maior valor para que a contrapartida fosse superestimada nesse aspecto. Para as outras alíquotas foram utilizados os valores informados pela Receita Federal como se seguem abaixo:

- COFINS (Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social): 7,6%
- PIS (Programa de Integração Social): 1,65%
- IR + CSLL (Imposto de Renda e Contribuição Social sobre Lucro Líquido): 34%

Os valores dos impostos refletem o regime de tributação pelo Lucro Real. Foi também considerado que a maior parte dos investimentos em CAPEX – *Capital Expenditure*, ou seja, despesas de capital ou investimento em bens de capital, se depreciaria em 10 anos, ou seja, os ativos se depreciam 10% ao ano na presente avaliação.

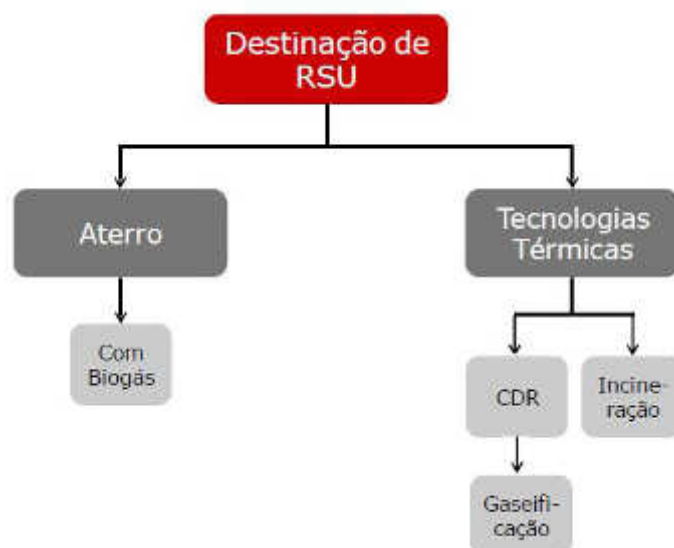
Considerando a composição gravimétrica atual média do RSU brasileiro indicado na tabela 6, somada à perspectiva de aumento da reciclagem dos seus

componentes, adotaremos como premissa para esse estudo o RSU com PCI de 1.980 kcal/kg. O fluxo de destinação do RSU será conforme a figura 29, onde poderão ser adotados 3 meios, sendo eles a geração de biogás, gaseificação de CDR e incineração.

Tabela 6 – Poder Calorífico do RSU

Fonte: CEMIG/FEAM 2011.

Componente	Composição Gravimétrica (%)	PCI Individual (kcal/kg)	Contribuição ao PCI Total (kcal/kg)	% do PCI Total
Mat. Orgânica	51,4	712	366	19
Plásticos	13,7	8.193	1.122	57
Papel e Papelão	13,1	2.729	434	22
Têxteis e Couro	2,8	1.921	23	1
Madeira	1,2	2.490	30	1
Borracha	0,5	8.633	5	0
Inertes	17,3	0	0	0
Soma	100,0		1.980	100,0



FONTE: Autoria Própria

Figura 29– Aproveitamento Energético.

3.1 Custos de Investimento em Incineração

A tabela 7 a seguir, resume os valores adotados para a análise econômica e financeira do incinerador “mass burn”. O RSU “*in natura*” brasileiro apresenta, nas condições atuais, um poder calorífico (PCI) aceitável para ser usado como combustível em incineradores “mass burn”, entretanto, como mostrado na tabela 6, o cálculo desse PCI é altamente dependente da contribuição dos plásticos e dos diferentes tipos de papel, ou seja, 57% e 22% do PCI total. Isto significa que a remoção de materiais recicláveis de RSU, nas proporções

preconizadas na PNRS, poderá dificultar o seu uso como combustível em incineradores “*mass burn*”, sendo necessário o uso de combustíveis fósseis (como gás natural ou GLP) para assegurar a manutenção da queima do RSU. Desta forma, para este estudo, não estão sendo considerada a venda de recicláveis e metais. No caso da planta de incineração que será constituída em São Bernardo, conforme consulta pública em 2009, a mesma deverá possuir central de triagem. Esta triagem, conforme explicado acima, acarretará perda de poder calorífico do RSU e rendimento global da planta.

Tabela 7– Premissas Incineração

Fonte: Autoria Própria.

ITEM	UNIDADE	VALOR
Volume diário processado	t/dia	2.000
Dias de operação por ano	dia/ano	365
Poder Calorífico Inferior	kcal/kg	1.980
Geração de Eletricidade	MWh/t	0,5
Investimento Total	U\$ milhões	420*
Custo de O&M	R\$/t	100
Valor Cobrado na Recepção do RSU	R\$/t	65
Preço de Venda da Eletricidade	R\$/MWh	180
Taxa de desconto	% a.a.	12
Taxa de alavancagem	%	20/80
Taxa de Juros	% a.a.	6,5

Dólar base R\$ 3,00 reais

* Fonte Columbia University 2011

A projeção dos resultados anuais em fluxo de caixa de 20 anos, segundo os parâmetros anteriormente expostos, levou ao seguinte resultado:

VPL - VALOR PRESENTE LÍQUIDO	-R\$ 551.376.379,13
TIR - TAXA INTERNA DE RETORNO ALAVANCADA	-8,10%

3.2 Custos de Investimentos em Aterro sanitário com aproveitamento do biogás.

A tabela 8, mostra os parâmetros adotados para o aterro sanitário. Para estimar o CAPEX, foi utilizado principalmente um estudo detalhado da FGV. Outras fontes e estudos foram consultados para confirmar a validade dos valores encontrados. O volume de investimento necessário foi em função da etapa do ciclo de vida do aterro 20 anos.

Tabela 8 – Premissas Aterro Sanitário

Fonte: Autoria Própria.

ITEM	UNIDADE	VALOR
Volume diário processado	t/dia	2.000
Dias de operação por ano	dia/ano	365
Poder Calorífico Inferior - Biogás	kcal/m³	5.000
Geração de Biogás – 60% captado	m³/ano	27.230.352
Geração de Eletricidade	kWh/m³	1,43*
Investimento Aterro – Capex	R\$ milhões	22,25**
Investimentos Motogeradores – 750kW	R\$ milhões	22,5***
Operação e Manutenção	R\$ milhões/ano	28,47**
Valor Cobrado na Recepção do RSU	R\$/t	65
Preço de Venda da Eletricidade	R\$/MWh	180
Taxa de desconto	% a.a.	12
Taxa de alavancagem	%	20/80
Taxa de Juros	% a.a.	6,5

* Fonte - CARDOSO (2001) apud Cenbio (2006)

** Fonte – FGV- Abetre (2007)

*** Fonte – Guascor, (2014)

Metodologia de cálculo de biogás - IPCC (1996)

A projeção dos resultados anuais em Fluxo de Caixa de 20 anos, segundo os parâmetros anteriormente expostos, levou ao seguinte resultado:

VPL - VALOR PRESENTE LÍQUIDO	R\$ 61.981.531,17
TIR - TAXA INTERNA DE RETORNO ALAVANCADA	78,29%

3.3 Custos de Investimentos em Gaseificação.

Para esta metodologia de recuperação energético do RSU, os valores de CAPEX e OPEX – *Opertinal Expenditure*, ou seja despesas operacionais, para uma usina de gaseificação, foram baseados em orçamentos realizados pela empresa Carbogas Ltda. Para atendimento deste volume de RSU (2.000 ton/dia), serão necessários a implementação de 4 (quatro) módulos independentes de 500 ton/dia. Isso se faz necessário, para evitar o efeito escala de reatores de grandes potências, mitigação de riscos e aumento do range de operação.

O valor apresentado na tabela 9, contempla o CAPEX de todas as 4 (quatro) unidades de 500 ton/dia, bem como os valores de OPEX respectivos.

Tabela 9– Premissas Gaseificação

Fonte: Autoria Própria.

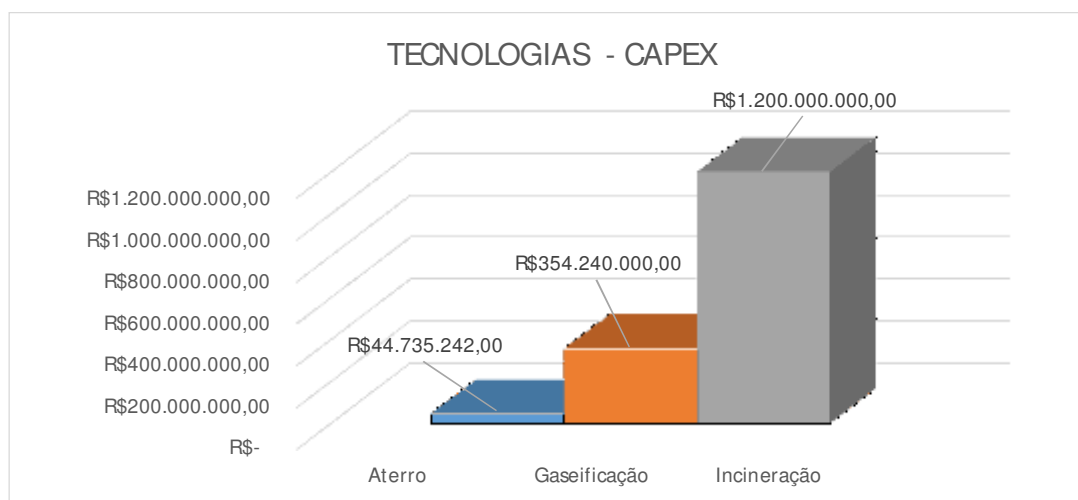
ITEM	UNIDADE	VALOR
Volume diário processado	t/dia	2.000
Dias de operação por ano	dia/ano	365
Poder Calorífico Inferior – Gás Síntese	kcal/Nm³	1.160
Geração de Gás Síntese	Nm³/ano	844.913.793
Geração de Eletricidade	kWh/Nm³	0,348*
Investimento Usina – Capex (4 unid)	R\$ milhões	354,24**
Operação e Manutenção – (4 unid)	R\$ milhões/ano	20,5**
Valor Cobrado na Recepção do RSU	R\$/t	65
Preço de Venda da Eletricidade	R\$/MWh	180
Taxa de desconto	% a.a.	12
Taxa de alavancagem ⁴	%	20/80
Taxa de Juros	% a.a.	6,5

* Fonte – CARBOGAS LTDA (2015)

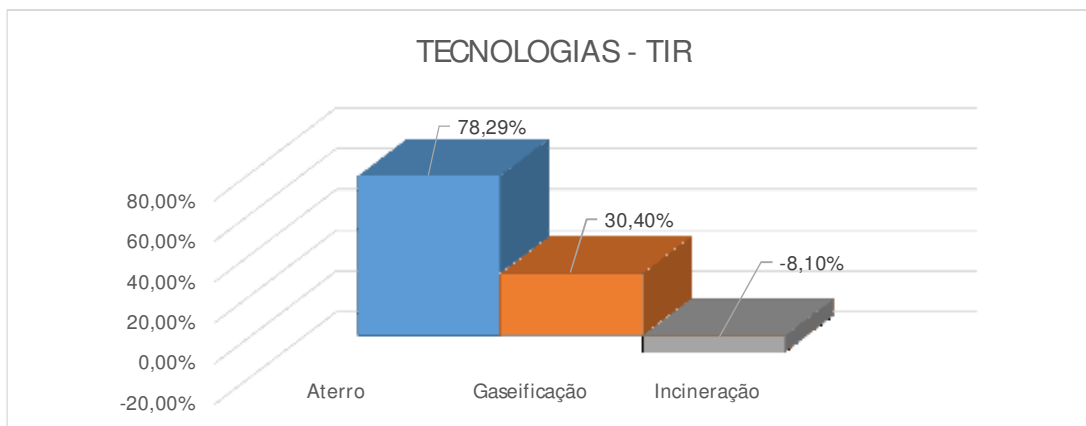
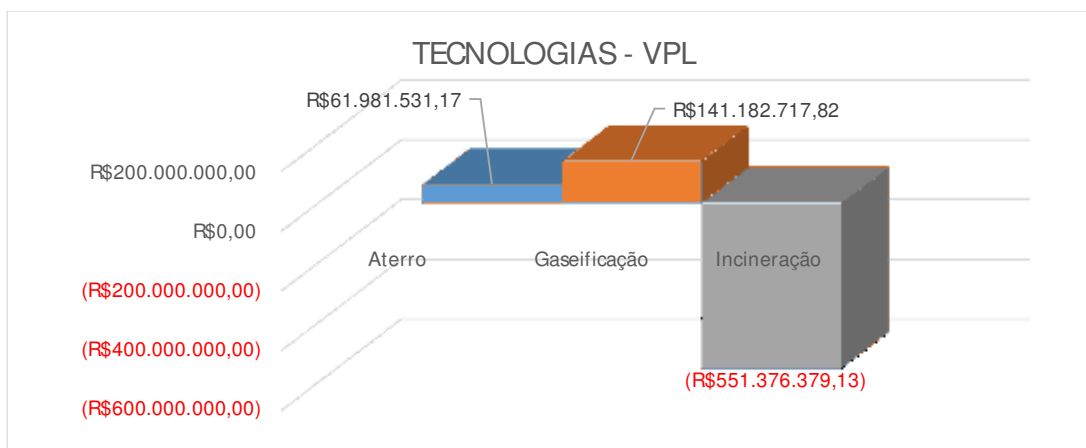
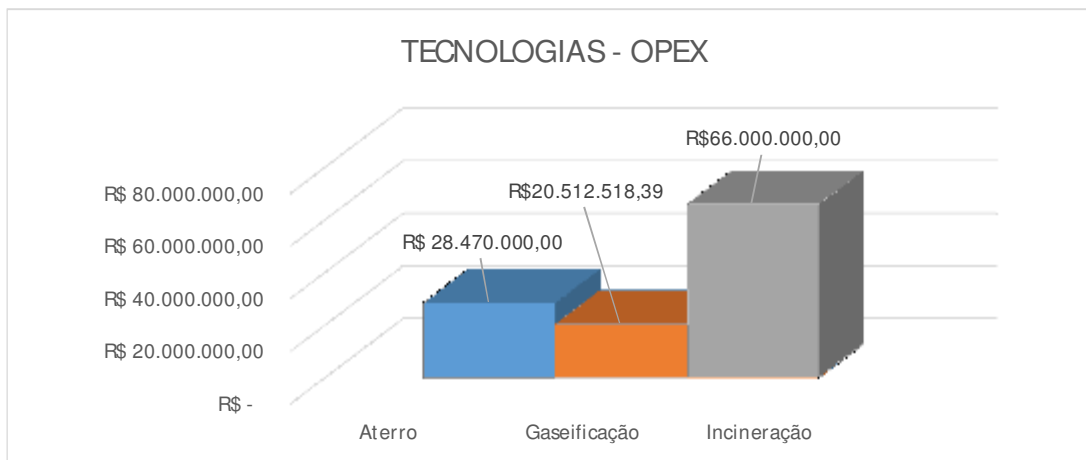
** Fonte – CARBOGAS LTDA (2015)

A projeção dos resultados anuais em Fluxo de Caixa de 20 anos, segundo os parâmetros anteriormente expostos, levou ao seguinte resultado abaixo e indicados na figura 30:

VPL - VALOR PRESENTE LÍQUIDO	R\$ 141.182.717,82
TIR - TAXA INTERNA DE RETORNO ALAVANCADA	30,40%



⁴ termo geral para qualquer técnica aplicada para multiplicar a rentabilidade por meio de endividamento



FONTE: Autoria Própria, 2015

Figura 30 – Resultados Financeiros.

Baseado no que foi apresentado nos valores financeiros, podemos concluir que as tecnologias de utilização de biogás em aterro sanitário e gaseificação, apresentam os melhores resultados de VPL – Valor Presente Líquido e TIR – Taxa Interna de Retorno, para tomada de decisão. O mesmo não acontece com a tecnologia de incineração, onde os resultados apresentados, mostram uma inviabilidade econômica com os valores praticados na venda da energia elétrica

e de recebimento do resíduo sólido. Para que o VPL seja igual a “zero”, e mantendo o valor de recebimento do resíduo sólido em R\$ 65,00 reais, o valor de venda da energia elétrica deveria atingir o valor de R\$ 536,21 reais, ou seja, 300% superior a praticada.

Entretanto é necessário ressaltar, que a indisponibilidade de novas áreas licenciadas para abertura de novos aterros e as novas diretrizes da lei nº 12.305, de agosto de 2010 – Política nacional de Resíduos Sólidos, converge para o melhor aproveitamento energéticos dos resíduos sólidos urbanos eliminando o volume de resíduos aterrados. Desta forma, podemos concluir que a tecnologia de gaseificação surge como uma forte vertente neste quesito, baseado nas vantagens já apresentadas.

Assim, conforme o fluxograma da figura 31, o objetivo deste trabalho é apresentar o estudo de caso de uma usina de beneficiamento e recuperação energética de resíduos sólidos urbanos para a cidade de Palmital-SP, para processamento de 450 ton/dia de RSU com geração energética de 8,2 MW por meio da gaseificação em leito fluidizado circulante, de resíduos sólidos urbanos, desenvolvido pela empresa Carbogas Ltda.



FONTE: Autoria Própria, 2015

Figura 31 – Aproveitamento Energético do RSU.

4- PROJETO CIVAP

4.1. Objetivo

De posse das informações a respeito das tecnologias apresentadas, das viabilidades econômicas e das vantagens mencionadas da gaseificação de resíduos sólidos urbanos, o presente trabalho tem como objetivo a implantação de uma unidade de tratamento de 450 toneladas dia de resíduos classe II-A, denominado CIVAP – Consorcio Intermunicipal do Vale do Paranapanema, que consistirá na recepção, processamento, industrialização, acondicionamento, trituração, separação magnética de metais, prensagem, abatimento de umidade, enfardamento e acondicionamento para destinação térmica por meio de gaseificação em leito fluidizado circulante com posterior geração de energia elétrica utilizando caldeira e turbina a vapor.

Os resíduos que chegarem à usina de gaseificação serão controlados quanto à origem, quantidade e natureza, por meio de um sistema de rastreabilidade. A pesagem em balança permitirá também, através da diferença de peso bruto obtido na chegada e a tara obtida na saída do veículo, determinar a quantidade, em massa, de resíduo consumido na usina objetivando o controle de rendimento global da planta.

4.2. Localização

A área localizada no município de Palmital – SP, encontra-se a beira da Rodovia SP-270 “Rodovia Raposo Tavares”, próxima ao Km 427, sentido interior, aproximadamente a 500 metros do trevo do posto Palmital-SP, e próximo à estrada municipal de Palmital PMT 348, nas coordenadas UTM 576248.70 E e 7488103.48 N, conforme figura 32.

A Área do objeto de estudo é de atividade agrícola, utilizada até então para fins agrícolas, como plantio de milho, e passará a ser utilizada para a atividade de beneficiamento e Industrialização de Resíduos Classe II – A, segundo Norma ABNT 10004:2004, para formação de CDR – Combustível Derivado de Resíduos.



FONTE: Google Earth, 2014

Figura 32 – Localização Usina de Gaseificação.

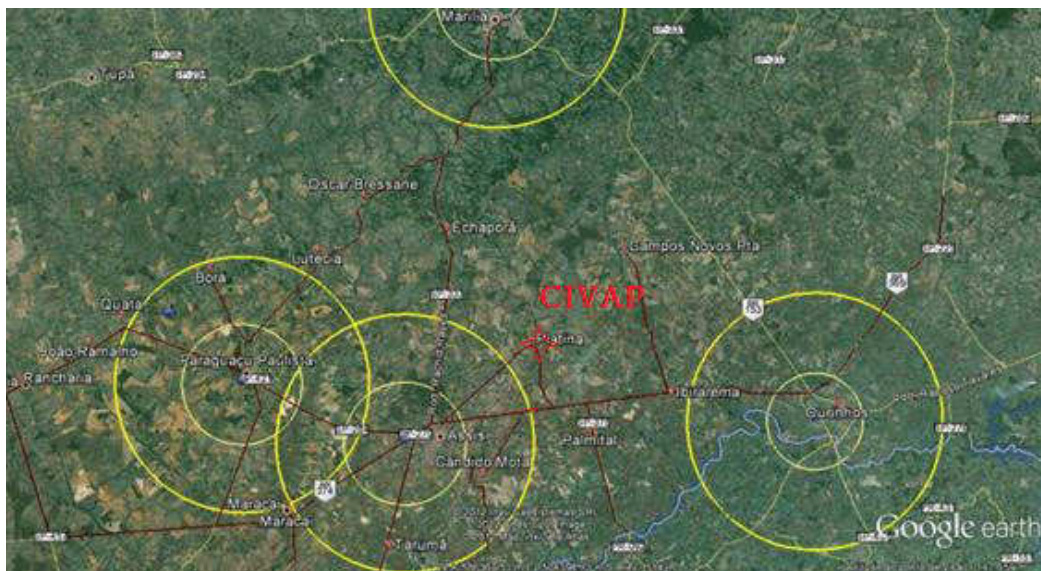
A área escolhida para a instalação da usina de gaseificação de resíduos sólidos urbanos levou em consideração a logística, localização e acessos, zonas aeroportuárias, Plano Diretor, atividades anteriormente implantadas e altitude do terreno.

O primeiro critério utilizado para localização da área foi verificar a região abrangida pela Área de Gerenciamento de Risco Aviário, para adequar o projeto fora dos 20 km, para que não houvesse a necessidade da anuência do IV COMAR – Comando Aéreo Regional. (Portaria nº 256/CG5) baseado no item 4.2.7 do plano básico de gerenciamento de risco aviário, conforme figura 33.

“4.2.7. Não opinar sobre empreendimentos localizados fora das AGRA”.

Nota: é remota a possibilidade de um foco de atração de aves, localizado a mais de 20 Km de distância de aeroportos, mostrar-se relevante para a segurança das operações de voo, quando comparado aos focos localizados no interior das AGRA. ” (Plano Básico de Gerenciamento de Risco Aviário).

Portanto para análise das opções foi levantado os aeroportos públicos na região do empreendimento, visando áreas localizadas fora do limite externo da AGRA, conforme imagem abaixo.

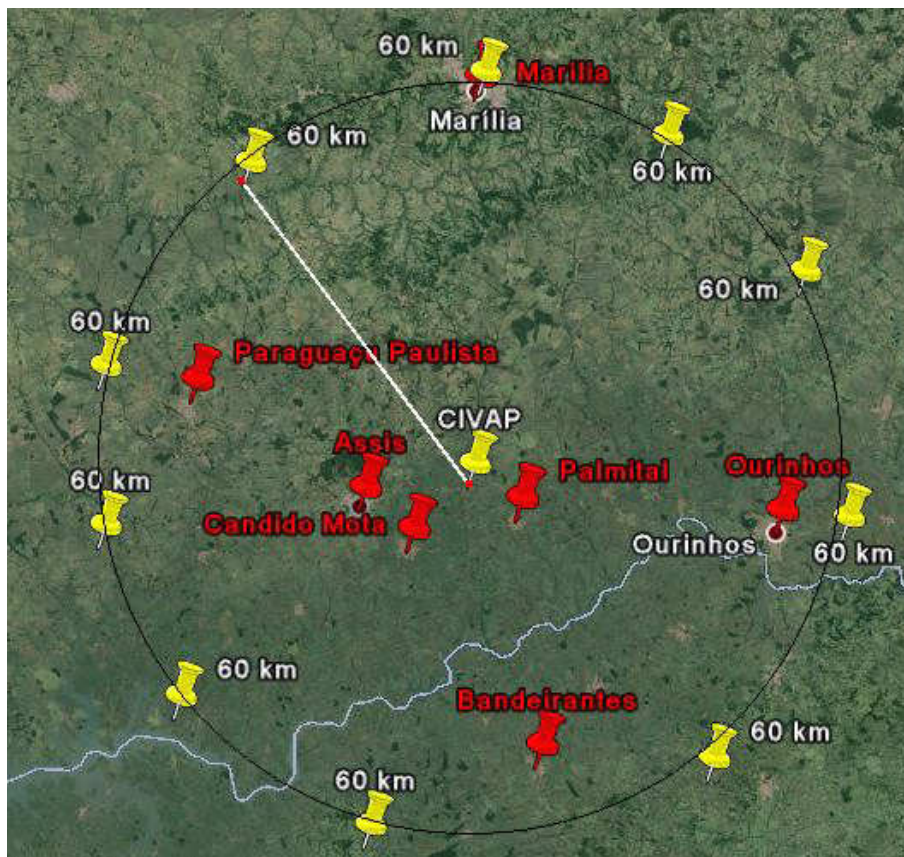


FONTE: Google Earth, 2014

Figura 33 - Aeroportos Públicos na Região.

Com isso, observa-se, que Palmital, na SP 270 - Rodovia Raposo Tavares na cor marrom, apresenta o melhor traçado para a localização do empreendimento, e fora dos limites da AGRA, assim como com a melhor localização referente a topografia e distâncias dos geradores de resíduo à Usina.

Após a delimitação das áreas de interferência do risco aviário buscou-se avaliar os impedimentos legais observados no Plano Diretor Municipal de Palmital, a logística para o empreendimento, melhores rotas, avaliação do uso anterior da área e localização do terreno. A identificação da melhor localização da área baseou-se na área de abrangência dos grandes centros geradores de resíduos sólidos urbanos, dentre eles os quais são: Marília; Ourinhos, Assis, Cândido Mota, Palmital, Paraguaçu Paulista e Bandeirantes.



FONTE: Google Maps, 2014

Figura 34 – Área de abrangência dos Municípios Geradores de Resíduos.

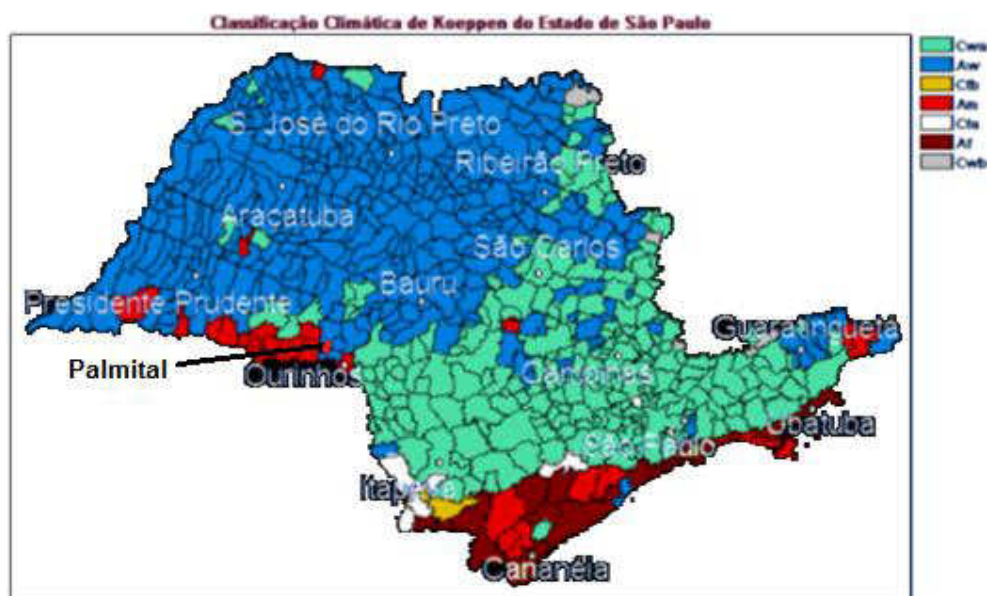
Conforme a figura 34, empreendimento contará com a recepção de resíduos de 26 municípios, em um raio de 60 km da usina, sendo eles: Ourinhos, Assis, Palmital, Cândido Mota, Marília, Lutécia, Paraguaçu Paulista, Maracá, Ribeirão do Sul, Campos Novos Paulista, Platina, Salto Grande, Ibirarema, Andirá, Cambará, Tarumã, Bandeirantes, Oscar Bressane, Ocaçu, São Pedro do Turvo, Echaporã, Pedrinha Paulista, Florínia, Santa Mariana, Santo Antônio da Platina e Jacarezinho, com uma população total entre os municípios de 783.244 habitantes conforme dados do IBGE 2014 - Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais. Se aplicarmos a média de geração per-capita de 1,041 kg de RSU por habitante, teremos uma geração de 815.357 kg por dia ou 815,3 toneladas de RSU, o que satisfaz a necessidade inicial da usina de gaseificação proposta a qual necessitará de 450 toneladas de RSU por dia.

O principal acesso dos municípios à usina de gaseificação se dará pelas principais vias, como SP 333 (Rodovia Rachid Rayes), SP 421 (Rodovia José Bassil Dower) e SP 270 (Rodovia Raposo Tavares).

4.2.1 Clima Regional

De acordo com MORAES (2009), *apud* ALVES (2002), a região sudeste está posicionada latitudinalmente, sendo uma área de transição entre os climas quente de latitudes baixas e temperado de latitudes médias. A distribuição de chuvas na região se dá basicamente através de verões chuvosos e invernos secos, com precipitação média anual acumulada variando entre 1200 a 2000 mm. Esta região sofre a influência de dinâmicas climáticas externas a esta região, como, por exemplo, o evento El Niño. Oscilação Sul (ENOS).

Conforme a figura 35, o clima, segundo o Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura, define o Clima de Palmital, de acordo com a Classificação Climática de Koeppen. Am. . Clima Tropical Monçônico, podendo ser observado na figura abaixo, com o clima do Estado de São Paulo.



FONTE: Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura (IAC), 2014

Figura 35 – Mapa climático do Estado de São Paulo

A classificação climática de Köppen-Geiger, demonstrada na tabela 10, divide os climas em 5 grandes grupos "A", "B", "C", "D", "E" e outros tipos e subtipos. A primeira letra, maiúscula, denota a característica geral do clima de uma região, constituindo o indicador do grupo climático, sendo "A" - Clima Tropical, "B" - Clima Árido, "C" - Clima Temperado ou Temperado Quente, "D" - Clima Continental ou Temperado Frio e "E" - Clima Glacial. A segunda letra, minúscula, estabelece o tipo de clima dentro do grupo, e denota as particularidades do regime pluviométrico. A terceira letra, minúscula, denota a

temperatura média mensal do ar dos meses mais quentes. No caso específico observa-se, “A” - Clima Tropical e características, Climas megatérmicos, temperatura média do mês mais frio do ano $> 18^{\circ}\text{C}$, estação invernal ausente, forte precipitação anual; e “m” - Clima de monção, com precipitação total anual média $> 1500\text{ mm}$ e precipitação do mês mais seco $< 60\text{ mm}$.

Tabela 10– Classificação Climática Koppen – IAC

Fonte: Instituto Agronômico de Campinas

Tipo	Limite térmico e pluviométrico	Distribuição de chuva	Variação anual da temperatura
A	12 meses $> 18^{\circ}$	f = ausência de seca w = seca de inverno w' = chuva de outono s = seca de verão m = monção	i = isothermal (amplitude $< 5^{\circ}\text{C}$)
BS*	$pa < 2t + 28$ $pa < 2t$	Seca de inverno Seca de verão	h = temperatura anual $> 18^{\circ}\text{C}$ k = temperatura anual $< 18^{\circ}\text{C}$
BS*	$pa < t + 14$ $pa < t + 14$	Seca de inverno Seca de verão	a um mês $> 18^{\circ}\text{C}$ k' = 12 meses $< 18^{\circ}\text{C}$
C	1 mês $< 18^{\circ}\text{C}$ 12 meses $> -3^{\circ}\text{C}$	f = ausência de seca w = seca de inverno s = seca de verão	a = 1 mês $< 22^{\circ}\text{C}$ b = 12 meses $< 22^{\circ}\text{C}$ e 5 a 12 $> 10^{\circ}\text{C}$ c = 12 meses $> -38^{\circ}\text{C}$ e 1 a 4 meses $> 10^{\circ}\text{C}$ d = 1 mês $< -38^{\circ}\text{C}$
ET	12 meses $< 10^{\circ}\text{C}$ 1 mês = zero	-	-
EF	12 meses $< \text{zero}$	-	-

* pa - precipitação anual, em cm; t - temperatura anual, em $^{\circ}\text{C}$

O Instituto Agronômico de Campinas avalia que a região está sob a influência de quatro massas de ar: tropical continental, equatorial continental, tropical marítima e polar; as duas primeiras são responsáveis pela maior quantidade de chuvas durante o ano, resultando numa época mais chuvosa no verão com precipitação média mensal superior a 100 mm , correspondente aos meses de outubro a março, e uma época mais seca em julho e agosto, apresentando precipitação média inferior a 50 mm , obtendo uma precipitação anual com valores médios de 1.260 mm .

A umidade relativa apresenta valores médios, variando entre 68% e 78% , e, enquanto os valores máximos de cada mês apresentam uma alta uniformidade, em torno de 92% , os valores mínimos manifestam maior variabilidade, com valores mais altos, em torno de 65% , entre março e junho e valores mais baixos entre agosto e outubro, cerca de 50% .

4.2.2 Predominância dos Ventos e Insolação

Com a maior frequência e velocidade do vento ocorrendo na direção sudeste - SE os valores médios diários registrados são da ordem de 3,5 m/s a 20,0 m do solo e de 2,4 m/s a 10 m do solo.

Segundo INO (2002) e Relatório Zero (1998), o normal de insolação total anual na bacia do rio Paranapanema cresce gradativamente de valor no sentido leste/oeste, desde o valor 2.000 horas anuais de insolação na foz do rio Paranapanema.

4.3 Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos

Segundo o Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM, 2001), a análise das características físicas dos resíduos sólidos pode ser feita considerando as seguintes informações:

- Geração *per capita*: relaciona a quantidade de resíduos urbanos gerada diariamente e o número de habitantes de determinada região.
- Composição gravimétrica: traduz o percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra de resíduo analisada. Os componentes mais utilizados na determinação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos são listados na tabela 11 abaixo.

Tabela 11 – Composição Gravimétrica Média no Brasil

Fonte: CIVAP 2010.

RESÍDUO	CURITIBA	S. PAULO	RIO	C. GRANDE	BHZ	POA	SSA	MANAUS	MÉDIA
PESO COLETADO (t/dia)				460					
Não recicláveis	54,5%	64,0%	65,1%	62,6%	64,6%	48,7%	56,4%	51,2%	58,4%
Matéria Orgânica	47,5%	57,5%	63,1%	57,2%	61,6%	43,9%	54,1%	45,2%	53,8%
Biomassa verde	0,0%	1,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%
Madeira	1,3%	1,6%	0,3%	0,6%	1,0%	0,7%	0,6%	3,6%	1,2%
Panos/Trapos	5,1%	3,9%	1,6%	4,7%	1,0%	3,5%	0,9%	1,2%	2,7%
Couros	0,6%	0,0%	0,1%	0,1%	1,0%	0,6%	0,8%	1,2%	0,6%
Recicláveis	37,9%	32,1%	34,1%	35,8%	26,6%	30,4%	21,7%	44,4%	32,9%
Papel/papelão	19,8%	11,1%	14,8%	13,2%	9,5%	10,9%	5,3%	18,9%	12,9%
Plásticos	9,9%	16,8%	14,7%	18,4%	10,9%	11,8%	12,8%	18,5%	14,2%
Vidros	4,2%	1,8%	2,7%	1,6%	2,9%	3,4%	1,9%	2,2%	2,6%
Borrachas	1,1%	0,2%	0,3%	0,9%	1,0%	0,3%	0,0%	1,2%	0,6%
Metais	2,9%	2,2%	1,6%	1,7%	2,3%	4,0%	1,7%	3,6%	2,5%
Rejeitos	7,6%	3,9%	0,8%	1,6%	8,8%	20,9%	21,9%	4,4%	8,7%
TOTAL	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

- Peso específico aparente: é o peso do resíduo solto em função do volume ocupado livremente, sem qualquer compactação, expresso em kg/m³. Sua determinação é fundamental para o dimensionamento de equipamentos e instalações. Na ausência de dados precisos, convém utilizar os seguintes

valores de peso específico: 230 kg/m³ para resíduo domiciliar, 280 kg/m³ para resíduos de serviços de saúde.

- Teor de umidade: representa a quantidade de água presente no resíduo, medida em percentual do seu peso. Este parâmetro se altera em função das estações do ano e da incidência de chuvas, podendo-se estimar o teor de umidade variando entre 40 e 60%.

- Compressividade: é o grau de compactação ou a redução do volume que uma massa de resíduo pode sofrer quando compactada. Submetido a uma pressão de 4 kg/cm², o volume do resíduo pode ser reduzido de um terço (1/3) a um quarto (1/4) do seu volume original.

Conforme Norma Técnica da ABNT NBR 10.004:2004, os resíduos também são classificados pelos seguintes grupos:

- Resíduos perigosos (classe I) – são aqueles que apresentam periculosidade ou apresentem uma das seguintes características: inflamabilidade; corrosividade; reatividade; toxicidade e; patogenicidade.

- Resíduos não perigosos, não inertes (classe IIA) – são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou de resíduos classe IIB, os resíduos classe IIA podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

- Resíduos não perigosos, inertes (classe IIB) – são quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo norma ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme norma ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

A origem é o principal elemento para a caracterização dos resíduos sólidos. Segundo esse critério, os diferentes tipos de resíduos podem ser agrupados em cinco classes

- Resíduo doméstico ou residencial: são os gerados nas atividades diárias em casas, apartamentos, condomínios e demais edificações residenciais.

- Resíduo comercial: são os gerados em estabelecimentos comerciais, cujas características dependem da atividade desenvolvida.

- Resíduo público: são aqueles presentes nos logradouros públicos, em geral resultantes da natureza, tais como folhas, galhadas, poeira, terra e areia, e também os descartados irregular ou indevidamente pela população, como entulho, bens considerados inservíveis, papéis, restos de embalagens e alimentos.

- Resíduo domiciliar especial: grupo que compreende os entulhos de obras, pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes e pneus. Os entulhos de obras, também conhecidos como resíduos da construção civil, só se enquadram nesta categoria devido à grande quantidade gerada e pela importância de sua recuperação e reciclagem.

- Resíduo de fontes especiais (industrial, radioativo, de portos, aeroportos e terminais rodoviários, agrícola e de serviços de saúde): são os resíduos que, em função de suas peculiaridades, passam a merecer cuidados especiais em seu manuseio, acondicionamento, estocagem, transporte ou disposição final.

O empreendimento proposto – CIVAP, atenderá apenas os resíduos sólidos urbanos classificados como resíduo doméstico, resíduo comercial, resíduo público e domiciliar, sendo compostos apenas de matéria orgânica, plásticos, papéis, borracha, vidro, metais, rejeitos, entre outros. A região a qual compreende os municípios de Assis, Borá, Cândido Mota, Lutécia, Palmital, Platina e Tarumã possuem características semelhantes aos resíduos dos demais municípios envolvidos, devido à fatores externos similares como fatores climáticos, demográficos e socioeconômicos. Assim, conforme tabela 12, seguiremos como base a composição gravimétrica destes municípios como espelho dos outros municípios envolvidos.

Tabela 12– Composição Gravimétrica da Região do Vale do Paranapanema

Fonte: Plano de Saneamento do CIVAP 2012.

Rsu	Média	Kcal/kg bs
Não recicláveis		
Matéria orgânica	54,10%	3.500,00
Madeira	1,60%	4.000,00
Trapos	3,90%	4.913,00
Couro	0,40%	4.467,00
Plástico filme	11,20%	10.400,00
Fraldas	4,30%	7.000,00
Tetra pak	1,50%	6.500,00
Recicláveis		
Papel	9,10%	4.206,00

Papelão	3,00%	4.127,00
Plástico duro	5,50%	9.140,00
Vidro	2,70%	-50,00
Borracha	0,30%	6.123,00
Metais ferrosos	2,00%	-50,00
Metais não ferrosos	0,20%	-50,00
Rejeitos	0,20%	3.000,00
Total	100,00%	

4.3.1 Definição de CDR

A busca de outras formas de combustíveis para processos termodinâmicos, teve início com a crise do petróleo em 1973, de acordo com o Instituto Técnico de Lisboa. Após a crise do petróleo iniciada no final de 1973, todos os países importadores de petróleo foram afetados, principalmente aqueles em desenvolvimento como o Brasil. A crise envolveu o processo de nacionalizações e de uma série de conflitos envolvendo os produtores árabes da OPEP – Organização do Países Exportadores de Petróleo, como a guerra dos Seis Dias (1967), a guerra do Yom Kipur (1973), a revolução islâmica no Irã (1979) e a guerra Irã-Iraque (a partir de 1980). Os preços do barril de petróleo atingiram valores altíssimos, chegando a aumentar até 400% em cinco meses (17 de outubro de 1973 – 18 de março de 1974). (A Revolução Iraniana, 2007).

Essa crise causou uma necessidade em se obter fontes alternativas de energia. A partir daí novas alternativas e tecnologias foram estudadas. No Brasil a saída para essa crise foi o Programa Nacional do Alcool (PROALCOOL), e na Europa foram desenvolvidos os Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR), que emergiram como potenciais combustíveis para a substituição de combustíveis fósseis com baixos custos. A dificuldade, no entanto (no início), ocorreu pela abundância do carvão que impediu a penetração deste combustível no mercado. Contudo, nos últimos 10 anos, tem havido um crescente interesse por parte dos setores cimenteiro, metalúrgico e energético em CDR por questões sobretudo econômica, mas também ambientais, principalmente pela política energética europeia, e as políticas desenvolvidas no Brasil – PNRS, para a gestão dos resíduos, dando um novo incentivo à utilização de CDR em processos termodinâmicos, baseados em resíduos não perigosos.

De acordo com estudos do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, definem-se Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR) os

combustíveis sólidos preparados a partir de resíduos não perigosos cuja utilização visa a recuperação de energia em unidades térmicas.

Mas para sua obtenção deste combustível – CDR, há a necessidade de uma linha de produção que consiste numa sequência de operações unitárias organizadas em série com o objetivo de separar componentes indesejados e condicionar a matéria de maneira a obter CDR com as características desejadas. Devido a isso o CDR tem sido largamente utilizado como combustível de substituição em várias instalações de co-incineração na Europa e suas vantagens de utilização como combustível substituto são:

- a. Redução da emissão de gases com efeito de estufa;
- b. Redução da emissão de gases ácidos;
- c. Redução da depleção de recursos naturais (materiais e combustíveis fósseis);
- d. Redução do impacto na água (lixiviados);
- e. Redução da contaminação de solos.

4.3.2 Métodos de Processamento e Industrialização de Resíduos Sólidos.

De acordo com o estudo de BANDEIRA (2010), existem dois métodos de produção de CDR a partir da fração com elevado poder calorífico do RSU:

TMB – Tratamento Mecânico Biológico e a bio-estabilização. A principal diferença entre eles consiste no fato de que, no TMB a fração orgânica putrescível não integra o CDR, enquanto no segundo caso, os orgânicos fazem parte do combustível produzido.

Na bio-estabilização os resíduos são estabilizados com o abatimento da umidade, ou seja, a perda de água e inativação biológica, e no processo são retirados os inertes e os metais.

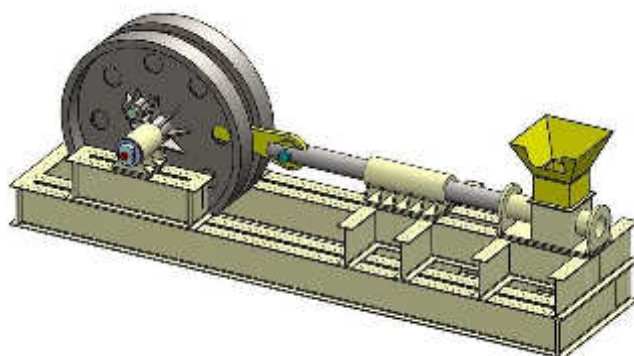
A tabela 13, adaptada do estudo de BANDEIRA (2010), mostra as etapas deste processo.

Tabela 13– Etapas da Bio-estabilização

Fonte: Gendebien et al. (2003).

Etapas	Objetivo	Comentários
Secagem	Reduz o teor de umidade para aumentar o calorífico e reduzir a atividade biológica	Pode ser mecânica ou biológica
Separação Mecânica	Separar possíveis recicláveis (metais); Separação de contaminantes (resíduos eletrônicos e pilhas e baterias)	Utiliza-se eletro-ímã para remoção de metais ferrosos; correntes Eddy para metais não ferrosos; infra vermelho para remoção de contaminantes
Redução Granulométrica	Aumentar homogeneidade;	Utiliza-se para homogeneização e aumento do PCI
Enfardamento	Facilitar armazenamento e Transporte	Utiliza-se para acondicionamento e proteção contra animais, vetores e poluentes

O processo concebido neste estudo é vinculado ao processo de bio-estabilização, no qual os resíduos processados serão triturados, havendo posteriormente a separação magnética de metais, prensagem e secagem, e enfardamento. Neste processo, os invólucros / fardos serão hermeticamente fechados, não havendo formação de gás e chorume. É importante destacar, que neste processo a estabilização para inativação biológica é fundamental, e visa o controle da temperatura, umidade, teor de carbono, teor de oxigênio, diminui a produção de odores, a degradação da matéria orgânica e o crescimento de patógenos. A figura 36 indica, entre os processos indicados acima, a prensa desaguadora, o qual possui a função de abater a umidade do resíduo através de choque mecânico.



FONTE: Carbogas 2015.

Figura 36 – Prensa Desaguadora de RSU com 400 tf.

4.3.3 Caracterização Biológica dos Resíduos

4.3.3.1 Carbono

Os resíduos e os CDR têm na sua constituição, nutrientes como o N, P e K, e quantidades apreciáveis de carbono (40 a 50% m/m – concentração

correspondente a massa de soluto por massa de solução, Martins Dias et al.), 2006, distinguindo-se dois tipos de carbono, de acordo com a sua biodisponibilidade o de origem renovável, denominado biogénico e de origem não renovável. O carbono degradável, de origem biogênica que pode ser encontrado em diferentes componentes dos resíduos sólidos como açúcares, amidos, celulose, óleos e gorduras, entre outros. Como, este carbono tem origem de materiais renováveis, sua queima permite a obtenção de benefícios na produção de eletricidade renovável e comércio de licenças de emissão de CO₂, conferindo característica de combustível renovável e não fóssil. Adicionalmente, pode encontrar-se o carbono sob a forma de cadeias complexas, dificilmente biodegradáveis como por exemplo plásticos e outros materiais de origem fósseis.

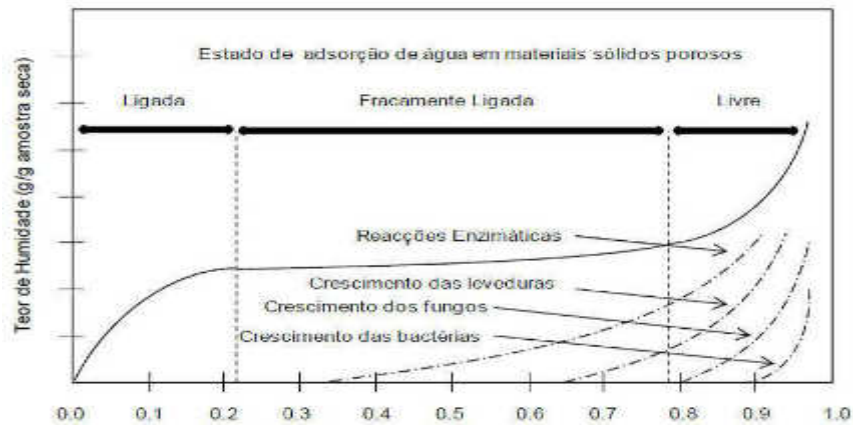
4.3.3.2 Oxigênio

Na decomposição aeróbia de resíduos, o fornecimento de oxigênio aos organismos determina a cinética de degradação. No entanto, matrizes sólidas como o CDR não oferecem as condições ótimas para o fornecimento de oxigênio, pois este deve estar dissolvido na fase aquosa. O oxigênio não é muito solúvel na fase aquosa, assim, a sua biodisponibilidade vai depender da capacidade de adsorção de água pelos resíduos (Miller e Clesceri, 2000).

Por outro lado, a degradação aeróbia vai depender da relação entre a taxa de transferência de oxigênio da fase gasosa para a fase líquida e a taxa de consumo por parte dos organismos (Miller e Clesceri, 2000).

4.3.3.3 Teor em Água

Ainda no estudo de MILLER E CLESCERI (2000), foi mostrado que a umidade é uma propriedade bastante utilizada para caracterizar o CDR, sobretudo para efeitos de queima e bio degradação. Para tanto, este parâmetro aponta que a atividade bacteriana está ligada diretamente com a água livre no resíduo, a água ligada ao resíduo não está disponível para os microrganismos, devido a energia necessária para sua captação, conforme figura 37.



FONTE: Adaptado de Miller e Clesceri 2000

Figura 37 – Estudos da absorção de água e a sua influência no crescimento de microrganismos.

Distinguem-se então três estados de adsorção da água nos resíduos:

- Ligada: neste estado a água não está disponível para os organismos, pois a energia requerida para extrair essa água do resíduo é muito elevada.
- Fracamente ligada: neste estado a disponibilidade da água depende dos organismos, do substrato e das condições químicas.
- Livre: a água está disponível para os organismos.

De acordo com MARCINKOWSKI (2006), a água é um dos mais importantes compostos químicos necessários para o crescimento, reparo, manutenção e reprodução dos microrganismos em geral, além de ser considerada vital para os mesmos. Sua principal função fora da célula viva é diluir os nutrientes e facilitar sua passagem através da membrana celular, enquanto no interior da célula sua principal atuação é como meio para reações químicas. Observa-se, portanto, que com a redução da umidade e consequentemente da água livre nos sólidos, reduz-se as atividades microbianas, reduzindo e/ou bloqueando drasticamente a degradação.

4.3.3.4 Fauna Própria

O termo fauna própria corresponde a quantidade de microrganismos presentes nos resíduos sólidos urbanos, os quais possuem quantidade significativa de matéria orgânica.

Quando a produção de CDR tem como matéria-prima resíduos industriais, geralmente a fauna própria é insuficiente para promover a degradação do resíduo. No entanto, o CDR proveniente do tratamento mecânico de RSU encontra-se contaminado com matéria orgânica putrescível, a qual propicia a

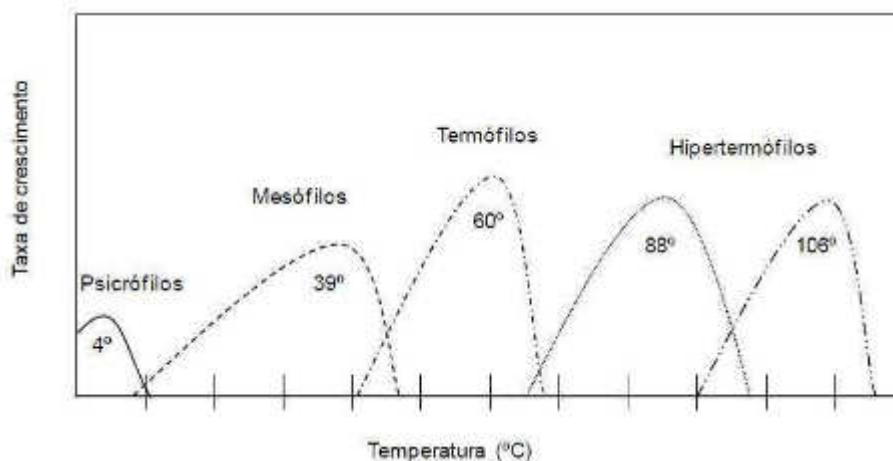
existência de microrganismos como as bactérias, os fungos e as leveduras (Tchobanoglous et al., 1993).

A temperatura influencia a atividade biológica dos organismos, pois existem valores ótimos de temperatura para os quais determinados organismos se desenvolvem.

Os microrganismos agrupam-se em diferentes temperaturas e distinguem-se quatro tipos:

- Psicrófilos: organismos extremófilos capazes de viver e de se reproduzir a temperaturas baixas
- Mesófilos: desenvolve-se melhor em condições de temperatura moderada, nem muito quente nem muito frio, entre os 15 e os 40 °C.
- Termófilos: sobrevivem a temperaturas de pelo menos 20 °C e um máximo de 75 °C.
- Hipertermófilos: resistem a temperaturas acima dos 75 °C, às vezes, até mesmo superior a 100 °C, desde que haja água líquida, tal como no fundo do mar, onde a pressão é elevada;

A Figura 38, ilustra as gamas de temperatura em que os diferentes microrganismos se desenvolvem.



FONTE: Madigan et al. 2000

Figura 38 – Relação entre a temperatura e a taxa de crescimento dos diferentes tipos de microrganismos.

O aumento da temperatura devido ao metabolismo respiratório dos organismos provém de o fato das reações aeróbias serem exotérmicas (Adani et al., 2006; Tchobanoglous et al., 1993). Durante a degradação do substrato, o calor produzido determina a variação de temperatura (Adani et al., 2006). A

estabilidade biológica é atingida com maior facilidade para temperaturas mesofílicas (35°C) ou moderadamente termofílicas (40-45°C), desde que as concentrações de oxigénio e umidade sejam mantidas num intervalo ótimo (Adani et al., 2002).

Desta forma, o controle da temperatura e umidade inibe a degradação do material, consequentemente possibilita sua estocagem, transporte e comercialização, sem perda de suas características físico químicas e PC, que são características desejáveis para o processo de gaseificação, o qual necessita de um combustível com teor de umidade abaixo de 15%.

4.3.4 Monitoramento da qualidade do CDR

A qualidade do CDR produzido é altamente influenciada pela caracterização inicial dos resíduos sólidos bem como pela quantidade de processos utilizados para o seu processamento e, ainda, pelo modo como estas estão ordenadas.

O projeto correto de uma unidade de produção de CDR é uma tarefa delicada devido a vários fatores. O principal é que a composição exata dos resíduos sólidos urbanos é difícil de prever e altera-se com o tempo. Os fatores que influenciam estas flutuações prendem-se com o fato de o RSU apresenta variações sazonais em termos de quantidade e qualidade o segue a trajetória econômica do país. Contudo é possível a definição de parâmetros a serem monitorados que possibilitam a classificação do CDR. Tal monitoramento permite o controle do material com o qual se está trabalhando, e permite ainda uma maior segurança e controle no envio do CDR a uma unidade térmica.

O sistema de classificação proposto pelo Projeto de Norma Portuguesa 4486:2008 tem por base três parâmetros importantes, relativos aos principais parâmetros dos CDR: um parâmetro econômico (poder calorífico inferior), um parâmetro técnico (teor de cloro) e um parâmetro ambiental (teor de mercúrio). O sistema de classificação do CDR é baseado em valores limites para os três parâmetros seguintes, utilizando a seguinte apresentação de dados:

- a) Poder calorífico inferior (PCI). Média aritmética em base tal como recebido;
- b) Teor de cloro. Média aritmética em base seca;
- c) Teor de mercúrio. Média e valor do percentil 80 em base tal como recebido.

O mais alto dos valores estatísticos (mediana e percentil 80) numa série de dados do mercúrio determina a sua classificação. Cada parâmetro é dividido em 5 classes devendo ser associado um número de 1 a 5 a cada parâmetro. O

código da classe consiste então numa combinação de três classificações, dado que os três parâmetros apresentam igual importância. A tabela 14 apresenta o sistema de classificação para os combustíveis derivados de resíduos na Europa. As faixas de valores do sistema de classificação proposto pelo Projeto de Norma Portuguesa 4486:2008 está sintetizado a seguir.

Tabela 14 – Monitoramento da Qualidade

Fonte: Norma Portuguesa 4486:2008

Parâmetro	Medida estatística	Unidade	Classes				
			1	2	3	4	5
Poder Calorífico Inferior (PCI)	Média	MJ/kg (tal como recebido)	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Teor em cloro	Média	% da base seca	$\leq 0,2$	$\leq 0,6$	$\leq 1,0$	$\leq 1,5$	≤ 3
Teor em mercúrio	Médiana	mg/MJ (tal como recebido)	$\leq 0,02$	$\leq 0,03$	$\leq 0,08$	$\leq 0,15$	$\leq 0,50$
	Percentil	mg/MJ (tal como recebido)	$\leq 0,04$	$\leq 0,06$	$\leq 0,16$	$\leq 0,30$	$\leq 1,00$

No Brasil, a produção de CDR ainda é incipiente e os padrões de qualidade e as normativas, ainda não são bem definidas perante os órgãos ambientais. Mas seu coprocessamento iniciou-se em 1990, tendo sido normatizado pela primeira vez em 1998, com a Deliberação Normativa COPAM nº 264 em Minas Gerais. Em nível federal foi publicada, em 1999, a Resolução CONAMA nº 264, referente ao licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos, excetuando-se os resíduos domiciliares brutos, de serviços de saúde, radioativos, explosivos, organoclorados, agrotóxicos e afins, além de estabelecer limites de emissões para material particulado e poluentes. A Resolução CONAMA nº 316/2002, referente ao tratamento térmico de resíduos, complementa a Resolução CONAMA nº 264/1999, ao estabelecer limites de emissões de dioxinas e furanos no coprocessamento.

Em 25 de agosto de 2010, foi publicada a Deliberação Normativa nº 154, que regulamenta o coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. Essa deliberação estabelece procedimentos, parâmetros e padrões para a realização do coprocessamento, e introduz a possibilidade de se coprocessar resíduos domiciliares após pré-tratamento ou tratamento e desde que seu poder calorífico inferior seja de, no mínimo, 2000 kcal/kg.

“Art. 10 – Os resíduos a serem coprocessados deverão apresentar Poder Calorífico Inferior – PCI mínimo de 2000 kcal/kg. ”

4.4 Fluxograma de Processo e Balanço de Massa.

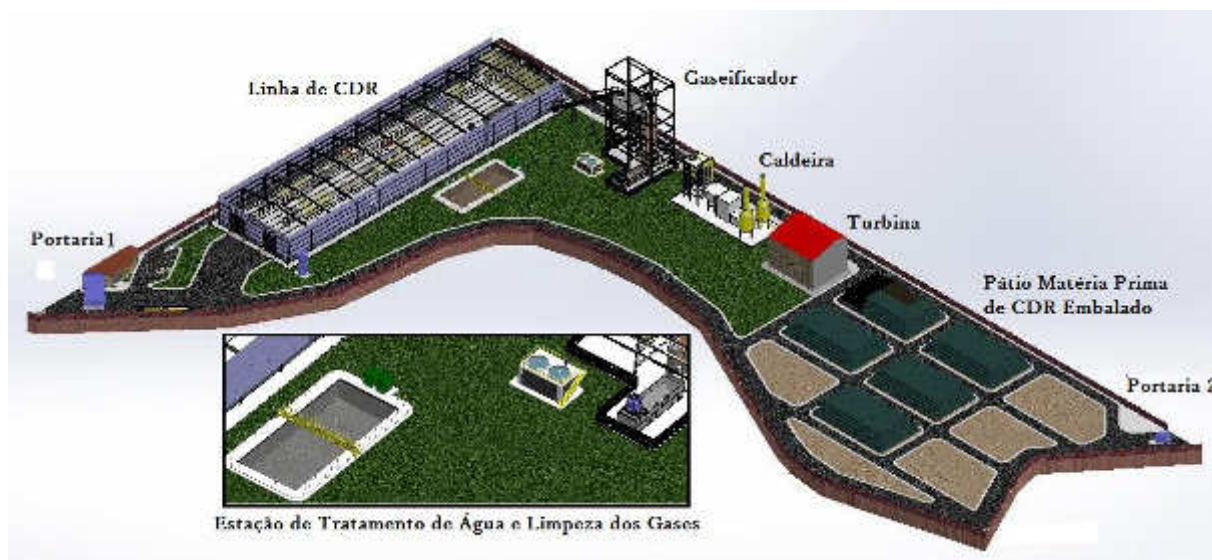
O projeto a ser instalado, será uma usina de beneficiamento do resíduo, com industrialização de resíduos classe II – A, para transformação em CDR e uso futuro na unidade de tratamento térmico por gaseificação, em consonância com as Resoluções CONAMA 316/02 e SMA 079/09. O empreendimento proposto será dimensionado para um consumo diário de 450 toneladas de resíduo sólido urbano por dia, com as seguintes composição gravimétrica da tabela 15.

Tabela 15 – Composição Gravimétrica do RSU

Fonte: CIVAP 2012

RSU	MÉDIA
NÃO RECICLÁVEIS	
MATÉRIA ORGÂNICA	54,10%
MADEIRA	1,60%
TRAPOS	3,90%
COURO	0,40%
PLÁSTICO FILME	11,20%
FRALDAS	4,30%
TETRA PAK	1,50%
RECICLÁVEIS	
PAPEL	9,10%
PAPELÃO	3,00%
PLÁSTICO DURO	5,50%
VIDRO	2,70%
BORRACHA	0,30%
METAIS FERROSOS	2,00%
METAIS NÃO FERROSOS	0,20%
REJEITOS	0,20%
TOTAL	100,00%

Este processo de transformação dos resíduos sólidos em combustível, obedecerá às seguintes etapas de tratamento, conforme figura 39:



FONTE: Carbogas 2015

Figura 39 – Arranjo Geral Empreendimento CIVAP

Na portaria deverá ser feito a triagem de pessoas e veículos, e fornecerá a segurança necessária controlando todo o perímetro da unidade, com central de monitoramento e comunicação. A portaria 01 fará o controle, fiscalização e encaminhamento de pessoas (visitantes e funcionários). A portaria 02 fará o controle e checagem do local de origem, cadastramento e/ou verificação, pesagem, e controle de pessoas.

Todo o material depositado para processamento será inspecionado afim de identificar qualquer inconformidade e averiguar se atende a classe de resíduo Não Inerte, classe II A. Constatada qualquer irregularidade, o gerador será notificado e todo o resíduo depositado, será devolvido ao gerador, ou será destinado à unidade competente e o valor cobrado do mesmo.

O processo do tratamento e industrialização, demonstrado na figura 40, deverá ser feito em um local coberto, fechado, com piso impermeabilizado, dotado de recolhimento de efluentes líquidos e com controle da poluição atmosférica, obedecendo o fluxograma das etapas a serem executadas para este processo.



FONTE: Autoria Própria

Figura 40 – Fluxograma de processo de produção do CDR.

Como observado no fluxograma, as etapas para a produção de CDR caracterizar-se-ão de recebimento do RSU, pesagem, recepção e verificação das conformidades e não conformidades, separação de metais, trituração e homogeneização, prensagem e redução da umidade, enfardamento, armazenamento e transporte. A figura 41 mostra o início de recepção e pesagem.



FONTE: Carbogas 2014

Figura 41 – Recepção e pesagem do RSU.

O resíduo sólido urbano, chegará em caminhões apropriados no empreendimento e serão basculados em baias de recebimento. Através de esteiras transportadoras o resíduo é levado conforme a figura 42, a um sistema de trituração primário (dois eixos) onde haverá a redução da granulometria do produto a dimensões entre 5-10 cm, processo que auxilia a redução da umidade e homogeneização da massa de resíduo, além de facilitar os próximos processos.

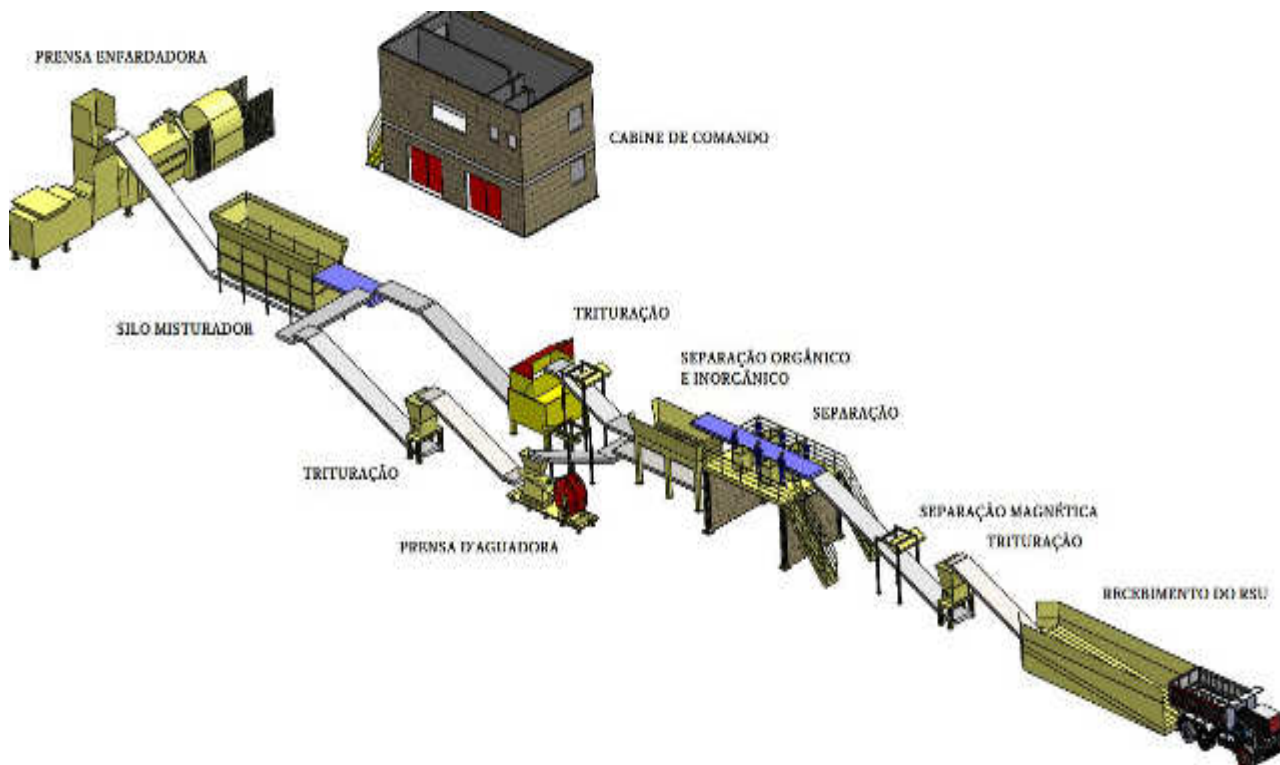


FONTE: Carbogas 2014

Figura 42 – Processo de Trituração < 50 mm do RSU.

Posteriormente o processo da trituração, os metais serão retirados do sistema por um ímã, sistema cross belt, no qual os resíduos triturados, passam por uma correia onde o ímã automático em suspensão segrega os metais ferrosos para reciclagem, e o restante segue para a esteira de catação onde será retirado somente o PET. Após a esteira de catação, o resíduo orgânico não selecionado, será encaminhado a uma peneira de discos rotativa. A mesma fará a segregação dos resíduos sólidos úmidos, para a prensa desaguadora.

Os resíduos sólidos secos, seguirão ao macinatore (triturador monoeixo de alta rotação) para fragmentação do material a uma granulometria desejada abaixo de 50 mm. Na segregação úmida, o resíduo separado irá para a presa desaguadora – figura 36, por meio de esteira transportadora, a qual por meio de choques mecânicos expulsará a umidade presente no material (água ligada) a uma pressão de trabalho de 1200 bar, nesta etapa do processo, o liquido gerado será também coletado para posterior tratamento. Com a retirada da umidade, os “pellets” formados pelos choques mecânicos, passam por um triturador (dois eixos) para sua desagregação e homogeneização da granulometria abaixo de 50 mm. A figura 43, mostra uma visão de conjunto de uma linha de processamento de RSU, nesta poderá ser observado os passos a passos do processamento.



FONTE: Carbogas 2014

Figura 43 – Linha de Processamento de RSU.

O CDR processado, seguirá para a prensa enfardadora onde será compactado e enfardado com umidade média de 15%, conforme figura 44. Os fardos terão aproximadamente 1,9 m³ em volume e com peso médio de 1.600 Kg (com dimensões aproximadas de 1,1 m por 1,1 m por 1,1-1,6 m). O Combustível Derivado de Resíduos (CDR) quando prensado, será amarrado por cintas plásticas para sua contenção conforme imagens abaixo.



FONTE: Carbogas 2014

Figura 44 – Processo de Prensagem e Enfardamento do CDR.

Posteriormente, conforme a figura 45, o CDR prensado e amarrado será embalado e envolvido por um filme de polipropileno ou polietileno. Este procedimento é necessário para manter as características do processo industrial e impedir as emissões de gases e geração de lixiviado. Finalizados, os fardos de resíduos embalados, serão destinados ao pátio de matéria prima com piso impermeável previamente preparado com dispositivos de coleta de águas pluviais, onde poderão permanecer ao ar livre por longo período de tempo (3 a 4 anos) sem causar problemas de lixiviados, odores ou risco de atrair animais nocivos e vetores de doenças desde de que o filme de polipropileno não seja rompido.



FONTE: Carbogas 2014

Figura 45 – Processo de Embalo do CDR.

Os fardos serão dispostos em pilhas prismáticas conforme figura 46. As bases das pilhas terão dimensão de 20 x 50 metros, com empilhamento máximo de 5 fardos. O pátio de matéria prima terá dimensão de 100.000 m² e possibilitará o armazenamento de aproximadamente 200.000 fardos. A cobertura das pilhas dos fardos faz-se necessária a fim de se aumentar a vida útil dos mesmos, protegendo-os, sobretudo dos raios ultravioletas (UV). O material a ser utilizado será a manta de fibra de vidro. A manta de fibra de vidro é um material

produzido basicamente a partir da aglomeração de finos filamentos flexíveis de vidro com resina poliéster (ou outro tipo de resina) e posterior aplicação de uma substância catalisadora de polimerização.



FONTE: Carbogas 2014

Figura 46 – Transporte e Estocagem do CDR.

O líquido gerado em todo o processo operacional de manuseio dos resíduos e transformação dos mesmos em CDR será tratado dentro da área do empreendimento e transformado em água de reuso. O reuso se dará para fins com baixa restrição sanitária, como a finalidade de lavagem de piso, irrigação de áreas verdes e combate a incêndio.

Após o todo o processamento do RSU, teremos as seguintes características gravimétricas, poder calorífico inferior e umidade, apresentadas na tabela 16.

Tabela 16 – Composição CDR

Fonte: Autoria Própria.

RSU	MÉDIA	Kcal/kg BS	Kcal médio	kg/h base umid	APÓS PROCESSAMENTO	
NÃO RECICLÁVEIS					12,0%	kg/h
MATÉRIA ORGÂNICA	54,10%	3.500,00	1.893,50	10.143,75	1.666,28	4772,17
MADEIRA	1,60%	4.000,00	64,00	300,00	56,32	141,13
TRAPOS	3,90%	4.913,00	191,61	731,25	168,61	344,01
COURO	0,40%	4.467,00	17,87	75,00	15,72	35,28
PLÁSTICO FILME	11,20%	10.400,00	1.164,80	2.100,00	1.025,02	987,95
FRALDAS	4,30%	7.000,00	301,00	806,25	264,88	379,30
TETRA PAK	1,50%	6.500,00	97,50	281,25	85,80	132,31
RECICLÁVEIS						
PAPEL	9,10%	4.206,00	382,75	1.706,25	336,82	802,71
PAPELÃO	3,00%	4.127,00	123,81	562,50	108,95	264,63
PLÁSTICO DURO	5,50%	9.140,00	502,70	1.031,25	442,38	485,15
VIDRO	2,70%	-50,00	-1,35	506,25	-1,19	238,16
BORRACHA	0,30%	6.123,00	18,37	56,25	16,16	26,46
METAIS FERROSOS	2,00%	-50,00	-1,00	375,00	-0,88	176,42
METAIS NÃO FERROSOS	0,20%	-50,00	-0,10	37,50	-0,09	17,64
REJEITOS	0,20%	3.000,00	6,00	37,50	5,28	17,64
TOTAL	100,00%		4.761,45	18.750,00	4.190,08	8.626,96

O CDR formado, será destinado a moega de armazenamento para posterior utilização nos silos alimentadores do gaseificador, a uma vazão mássica de 8.626,96 kg/h com PCI médio de 4.190,08 kcal/kg com 12 % de umidade. A tabela 17 apresenta o balanço energético do gaseificador.

Tabela 17 – Balanço Energético

Fonte: Autoria Própria.

Recebimento Diário de RSU	450	ton/dia
Após Processamento – CDR	207	ton/dia
Vazão Mássica	8626,96	Kg/h
Rendimento da Gaseificação	75	%
Energia Disponível para a queima na Caldeira	36147619	kcal / h
Potência do Gaseificador em Gcal/h	27,11	Gcal/h
Potência do Gaseificador em MWth	31,5	MWth
PCI do CDR	4.190,08	Kcal/kg
Cinza + outros	8,8	%
Enxofre	0,3	%
Densidade do Resíduo	250	Kg/m³
Carbono	48	%
Hidrogênio	7,6	%
Oxigênio	23,3	%
Densidade do Ar	1,293	Kg/Nm³
PCI do Gás	1160	Kcal/Nm³
Pressão ambiente	10000	mmCA
Umidade	12%	%

O CDR, após transitar pelas válvulas alimentadoras, é alimentado no gaseificador por meio de uma rosca sem fim. A dosagem de CDR no reator é realizada por “software”, que compilam as leituras dos instrumentos online (termopares, transdutores de pressão e medidores de vazão) instalados ao longo do reator, que resulta em movimento rotativo da esteira extratora do silo de alimentação, aumentando ou diminuindo a quantidade mássica de produto a ser inserido no reator.

Dentro do reator, o CDR em contato com o leito fluidizado circulante, composto de sílica a 850°C juntamente com o ar de processo proveniente dos sopradores, transforma-se em um gás combustível através de reações químicas demonstradas anteriormente balanço de massa demonstrado na tabela 18.

Tabela 18 – Balanço de Massa

Fonte: Autoria Própria.

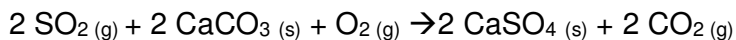
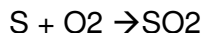
Vazão Mássica de CDR	8627,0	Kg/h
Massa De Produto Gaseificado	7419,2	Kg/h
Massa de Produto não Gaseif.	1207,8	Kg/h
Teor de Cinza	759,2	Kg/h
Massa de enxofre	25,88	Kg/h
Quantidade de calcário para abatimento do enxofre	80,88	Kg/h
Fator de Segurança	1,1	-
Quantidade Total de Calcário	88,97	Kg/h
Massa de Produto + Calcário	8715,9	Kg/h
Vazão volumétrica da mistura	34,508	m³/h
Teor de Agua na mistura	1035,2	kg/h
Densidade da mistura	252,6	kg/m³
Massa de Carbono na mistura	3561,2	Kg/h
Quantidade de O2 para oxidação do Carbono	9496,6	Kg/h
Quantidade de O2 para oxidação do Hidrogênio	4510,9	Kg/h
Quantidade de O2 na MP	1750,9	Kg/h
Quant. total necessária de O2	12256,5	Kg/h
Quantidade de Ar (combustão)	52580,4	kg/h
Relação ar gaseificação	0,37	%
Quantidade de Ar (gaseificação)	19434,0	Kg/h
Volume de Ar (gaseificação)	15030,2	Nm³/h

Assim para a gaseificação de 8.627 kg/h de CDR, é necessário o consumo de 19.434 kg/h de ar, ou seja, 37% da quantidade de ar necessária para uma combustão estequiométrica.

Os produtos não gaseificados no CDR, como produtos inertes e cinzas (8,8%), são extraídos pelo fundo do leito fluidizado, o qual está sendo sustentado por uma grelha. Este rejeito é extraído por rosca “sem fim” a qual está posicionada abaixo do *plenum* (câmara de equalização de pressão). Esta extração de cinza é realizada por meio de “software”, que compilam as leituras dos instrumentos online (termopares, transdutores de pressão e medidores de vazão) instalados no reator e resultam em movimento rotativo da rosca “sem fim”, aumentando ou diminuindo a quantidade mássica de produto a ser retirado no reator.

Juntamente com as cinzas, há a extração do sulfato de cálcio, pois durante o processo de gaseificação é necessário a adição de calcário que permita o abatimento do enxofre desprendido no processo, evitando assim a formação de H₂S com posterior geração de SO₂ na fase de combustão.

A absorção dos óxidos de enxofre pode ser representada pela reação a seguir:



Assim⁵,

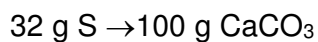
- $\text{CaCO}_3 = 40\text{Ca} + 12\text{C} + 48\text{O} = 100 \text{ g/mol}$
- $\text{SO}_2 = 32\text{S} + 32\text{O} = 64 \text{ g/mol}$
- $\text{O}_2 = 16 \text{ g/mol}$
- $\text{CaSO}_4 = 40\text{Ca} + 32\text{S} + 32\text{O} = 72 \text{ g/mol}$
- $\text{CO}_2 = 12\text{C} + 32\text{O} = 44 \text{ g/mol}$

Deste modo, analisando-se os reagentes, conclui-se que para se abater 32g de enxofre são necessários 100g de calcário.

Adotando-se para o cálculo, uma base de 1 kg de CDR, temos:

Quantidade de enxofre: 0,3 % = 3 g

Logo:



$$\text{Massa de calcário} = \frac{3 \times 100}{32} = 9,37 \text{ g CaCO}_3 / \text{kg de CDR}$$

Deste modo, para a vazão calculada de CDR 8.627 kg/h, necessitaríamos de 80,88 kg/h de calcário.

Como a pureza do calcário utilizado é de 96% e devido ao meio, é necessário um excesso de calcário para garantir uma absorção de enxofre satisfatória, desta forma, utilizamos um fator de segurança na dosagem sendo: $80,88 \times 1,1 = 88,97 \text{ kg/h}$.

⁵ Massa Atômica dos elementos

Ca = 40 g/mol

C = 12 g/mol

O = 16 g/mol

S = 32 g/mol



FONTE: Carbogas 2014

Figura 47 – Gás de Síntese de RSU.

Para controle do range (de 70 a 100%) de produção do gaseificador, há a necessidade de um “flare” antes da entrada na caldeira. Seu controle é realizado através de uma válvula controladora de pressão, que se abre quando o consumo de gás na caldeira está abaixo dos 70% da produção. Desta forma, o gás é desviado ao “flare” para que possa ser queimado totalmente em condições estequiométricas conforme figura 47.

O gás gerado no processo de gaseificação, possui um poder calorífico inferior entre 1.160 kcal/Nm³ a 1.260 kcal/Nm³ com volume e composição média conforme as tabelas 19 e 20.

Tabela 19 – Volume de gases de síntese

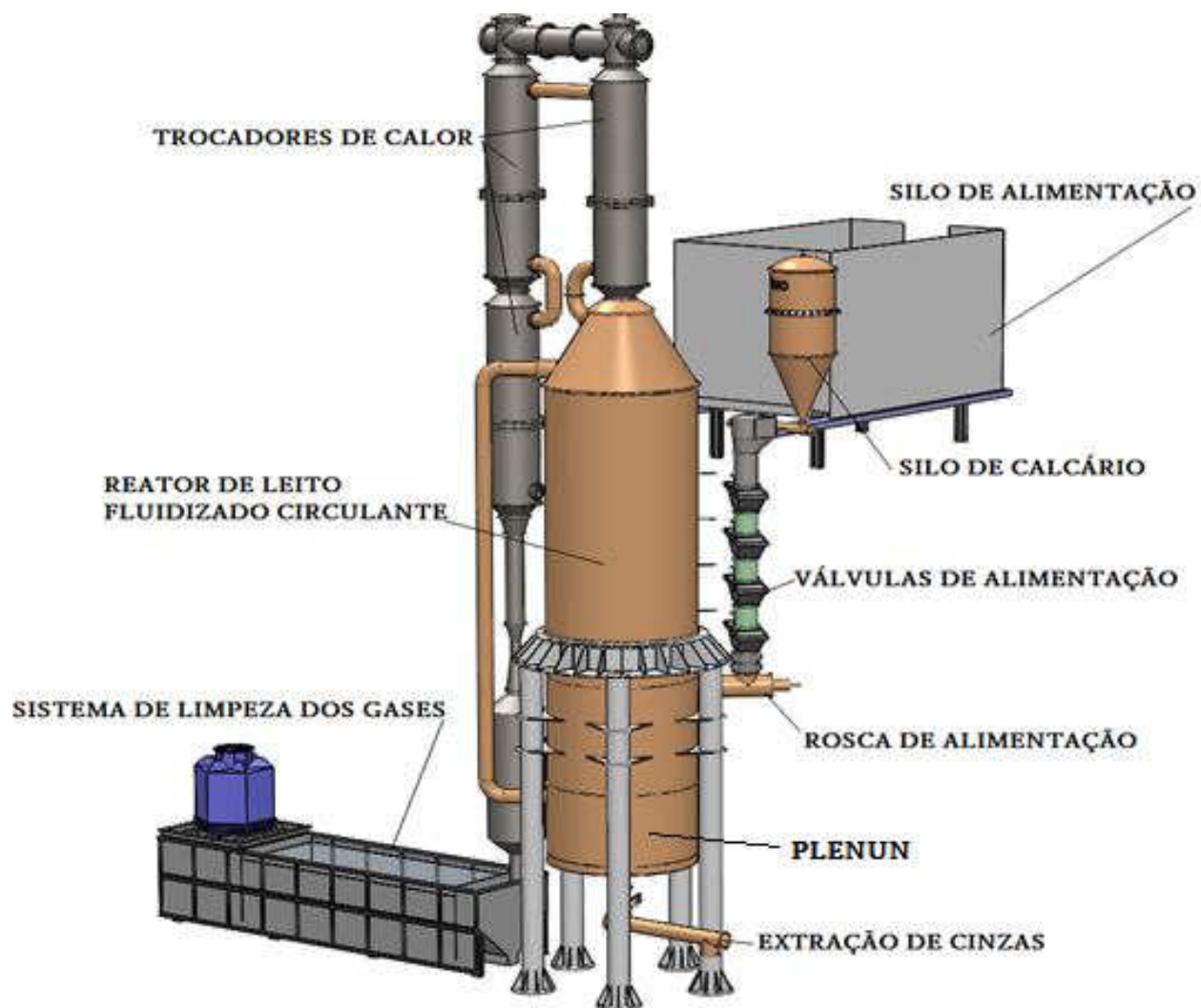
Fonte: Autoria Própria.

Volume de gases	23371,3	Nm ³ /h
Massa de gases	26094,1	Kg/h
Cinza + Particulado + Calcário	2055,91	Kg/h

Tabela 20 – Composição do gás de síntese

Fonte: Autoria Própria.

N ₂	49%	11451,94	Nm ³ /h	14421,20	kg/h
H ₂ O	6%	1402,28	Nm ³ /h	1130,15	kg/h
CO ₂	10%	2337,13	Nm ³ /h	3672,99	kg/h
CO	18%	4206,8	Nm ³ /h	5297,58	kg/h
H ₂	14%	3272,0	Nm ³ /h	296,66	kg/h
CH ₄	3%	701,14	Nm ³ /h	508,57	kg/h



FONTE: Carbogas 2014

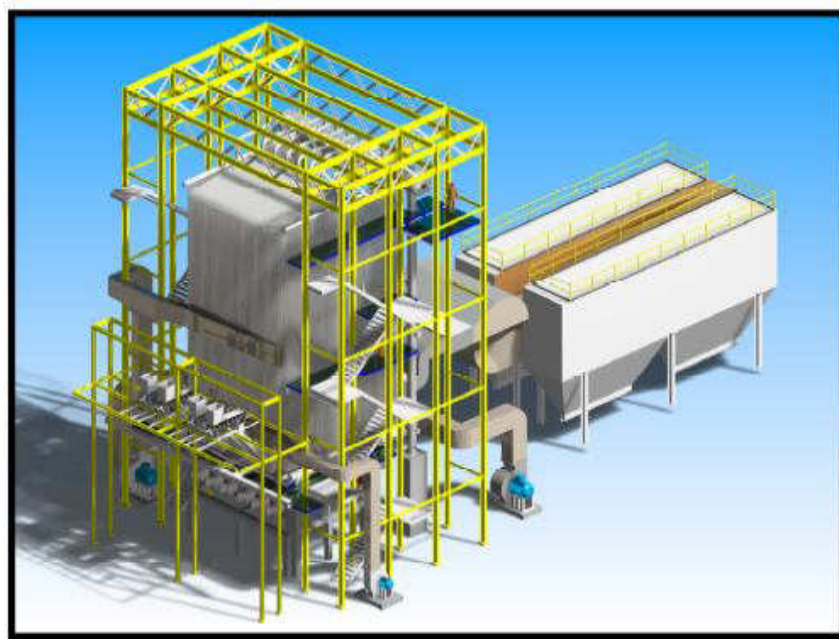
Figura 48 – Gaseificador de Leito Fluidizado Circulante.

O particulado arrastado e os produtos clorados são abatidos, por meio de adição de CaO ($\text{CaO} + \text{HCL} = \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$) na água de processo utilizando lavadores úmido de circuito fechado tipo Ventury e Scrubbers, que compõe o sistema de limpeza dos gases indicado no esquema da figura 48. O gás limpo e resfriado é enviado para a caldeira a gás, onde será queimado em condições estequiométricas para a liberação de calor e produção de vapor. O gás queimado, no volume de 23.371,3 Nm^3/h com PCI médio de 1.160 kcal/Nm^3 , libera energia suficiente na caldeira a vapor da figura 49, para que possa ser produzido 35 toneladas de vapor a 42 bar de pressão e 420°C indicados na tabela 21.

Tabela 21 – Geração de Vapor

Fonte: Autoria Própria.

Energia de Entrada na Caldeira	113431228,4 kJ/h
Entalpia Agua de Entrada na Caldeira - 42 bar (105°C)	440,1 kJ/kg
Entalpia Vapor de Saída na Caldeira - 42 bar (420°C)	3255,80 kJ/kg
Rendimento + Temperatura Gases de Exaustão	87%
Geração de Vapor	35048,6 kg/h



FONTE: Mitre 2013

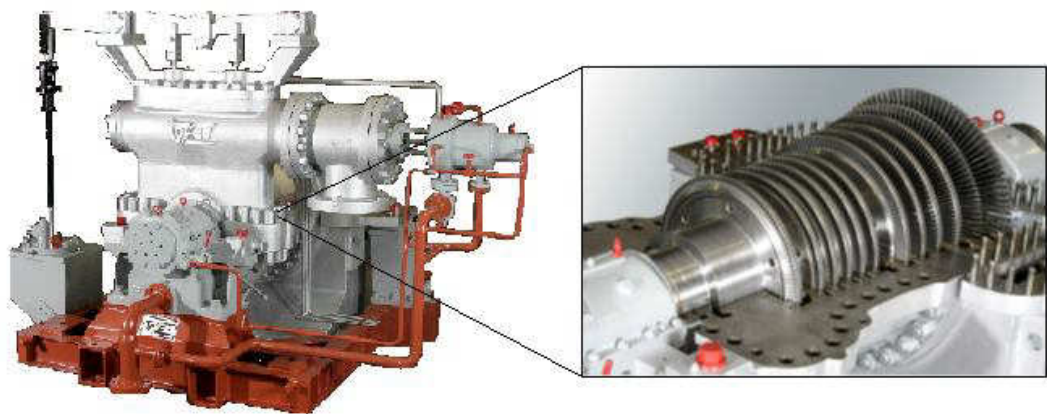
Figura 49 – Caldeira a Gás.

O vapor formado pela troca térmica dos feixes tubulares da caldeira com a água, é introduzido por meio de tubulação e válvulas a 2 (duas) turbinas a vapor de 5 MW de potência instalada, acopladas aos seus respectivos geradores de baixa tensão (440 V). A energia produzida através do processo de rotação da turbina é injetada em uma subestação elevatória (13, 8 kV) para ser conectada à rede de transmissão da concessionária local. Parte da energia produzida, retorna ao processo de gaseificação para alimentação dos motores, sopradores e etc.. As tabelas 22 e 23, descrevem os dados da turbina a vapor de marca Texas, bem como a figura 50 ilustra o corpo a turbina com suas pás rotativas e periféricos.

Tabela 22 – Dados da Turbina a vapor

Fonte: Texas Industrial Ltda.

Descrição	Dados	Unid
Pressão de admissão de vapor	42	Bar (a)
Temperatura de admissão de vapor.	450	° C
Pressão de escape de vapor	0,10	Bar (a)
Potência máxima nos bornes do Gerador	5.000	KW
Potência contínua de regime do Gerador	5.000	KW
Potência a ser utilizada	5.000	KW
Pressão da extração	2,5	Bar (a)
Vazão da extração (12% para desaerador)	2.580,1	Kg/h
Vazão de vapor de escape	18.921,0	Kg/h
Vazão de vapor total	21.501,1	Kg/h
Consumo específico nos Bornes do Gerador	4,30	Kg/Kwh
Rotação de trabalho	6.000	RPM
Rotação de desarme: Trip mecânico.	6.600	RPM
Trip elétrico.	6.720	RPM
Tipo de Extração	Não Controlada	
Aplicação do equipamento	Gerador	
Sentido de rotação da turbina	Anti-horário	

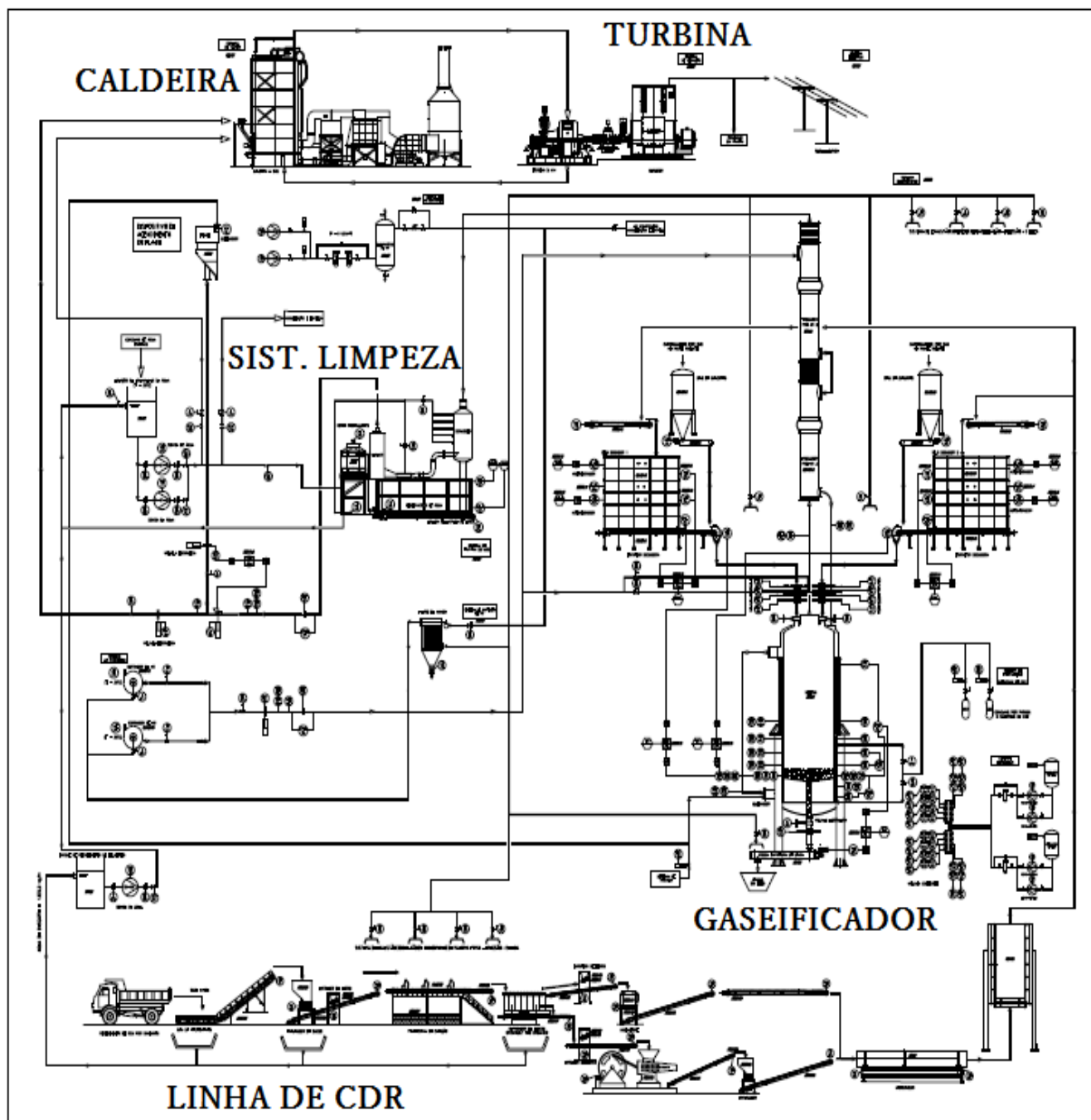


FONTE: Texas Industrial Ltda., 2015

Figura 50 – Turbina a Vapor Modelo TXC.

Tabela 23 – Dados de Geração de Energia Elétrica Fonte: Texas Industrial Ltda., 2015.

Dado - Consumo de Vapor na Turbina	21501,1 kg/h
Dado - Geração de Energia Elétrica na Turbina 2 unid.	5000,0 kW
Geração de Energia Elétrica Real	8150,4 kW
Consumo da Própria Planta	1450,0 kW
Energia Exportável	6700,4 kW



FONTE: Carbogas, 2014.

Figura 51 – Fluxograma de Processo

4.5. Viabilidade Econômica

Segue as premissas consideradas para a elaboração do modelo econômico-financeiro. O empreendimento será avaliado por meio do cálculo de seu Fluxo de Caixa Descontado, segundo taxas de desconto de 12% ao ano, para 15 anos de operação.

Os impostos utilizados para a avaliação financeira são aqueles informados pela Receita Federal. No caso do ISS – Imposto Sobre Serviço foi previsto 5%, visto que a taxa varia tipicamente entre 0% a 5%. Para as outras alíquotas foram utilizados os valores informados pela Receita Federal como se seguem abaixo:

- COFINS (Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social): 7,6%
- PIS (Programa de Integração Social): 1,65%
- IR + CSLL (Imposto de Renda e Contribuição Social sobre Lucro Líquido): 34%

Os valores dos impostos refletem o regime de tributação pelo Lucro Real. Foi também considerado que a maior parte dos investimentos em CAPEX, se depreciaria em 5 anos, ou seja, os ativos se depreciam 20% ao ano na presente avaliação. Metodologia de financiamento Tabela Price. Os valores de investimento e manutenção foram descritos na tabela 24.

Tabela 24 – Investimentos

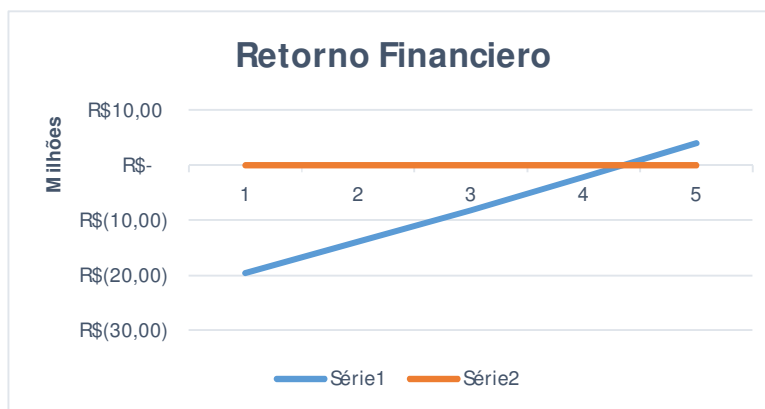
Fonte: Carbogas 2015.

INVESTIMENTO NA LINHA DE CDR		
Investimento linha de cdr	R\$ 25.000.000,00	R\$
Tempo de construção	2	ANOS
Custos indiretos	R\$ 4,21	R\$/ton
Opex	R\$ 5.539.258,29	R\$ /ano
Processamento anual de rsu	162000	ton
Receita de resíduo sólido urbano + metais	R\$ 13.645.922,73	R\$ /ano
Depreciação	5	ANOS
Quantidade de financiamento	80,0%	%
Juros financiamento	7,5%	%
Período financiamento	5	ANOS
Preço resíduo sólido urbano	R\$ 80,00	Ton
INVESTIMENTO SISTEMA DE GASEIFICAÇÃO		
Investimento	R\$ 50.500.000,00	R\$
Tempo de construção	2	ANOS
Custos indiretos	R\$ 622.334,09	R\$/MWh
Opex	R\$ 2.812.218,77	R\$ /MWh
Produção anual de energia elétrica	57.992	MWh/ano
Fator de capacidade	95	%
Preço energia elétrica	R\$ 215,00	MWh

Receita na venda de energia elétrica	R\$ 11.202.013,57	R\$ /ano
Depreciação	5	ANOS
Quantidade de financiamento	80,0%	%
Juros financiamento	7,5%	%
Período financiamento	5	ANOS
VPL - valor presente líquido	R\$ 30.437.529,09	
TIR - taxa interna de retorno	41,87%	

Abaixo segue a demonstração do fluxo de caixa do empreendimento CIVAP, demonstrando a fase pré-operacional e a fase operacional. Os investimentos serão realizados em duas fases Ano 1-2 e Ano 8-9, ou seja, primeiramente será concebido a linha de CDR e posterior a implementação do gaseificação e geração de energia elétrica. Esta metodologia será empregada para mitigar o risco do investimento e proporcionar caixa positivo com recebimento do resíduo para que a mesma sirva de aporte inicial para a segunda fase – Gaseificação e Geração. Neste período o CDR produzido será estocado em fardos hermeticamente fechados conforme figura 46. Este estoque proporcionará segurança na oferta de combustível, visto que no Brasil existem períodos de greve e sazonalidades na geração de resíduos na região. O excedente da produção CDR será comercializado até a conclusão da segunda fase, como combustível substituto nos fornos de clínquer conforme CONAMA nº 264. Este crédito na venda do CDR não está sendo considerado no fluxo de caixa.

Abaixo na tabela 25, segue o descritivo do fluxo de caixa do empreendimento CIVAP, considerando impostos, amortização, Opex da linha de CDR discriminada na tabela 26, Opex da unidade de gaseificação discriminada na tabela 27, recebimento pela disposição do resíduo sólido urbano, receita na venda da energia elétrica e depreciação.



FONTE: Carbogas, 2015.

Figura 52 – Retorno Financeiro.

	FASE FINANCIAMENTO LINHA DE CDR											
	FASE PRÉ OPERACIONAL						FASE OPERACIONAL					
	ANO 1		ANO 2		ANO 3		ANO 4		ANO 5		ANO 6	
(-) INVESTIMENTO LINHA DE CDR	-R\$	12.500.000,00	-R\$	12.500.000,00								
(+) FINANCIAMENTO LINHA DE CDR	R\$	10.000.000,00	R\$	10.000.000,00								
(-) INVESTIMENTO PLANTA DE GASEIFICAÇÃO												
(+) FINANCIAMENTO GASEIFICADOR												
(+) RECEITA RECEBIMENTO RESÍDUO												
(+) RECEITA VENDA ENERGIA ELÉTRICA			R\$	13.645.922,73	R\$	13.645.922,73	R\$	13.645.922,73	R\$	13.645.922,73	R\$	13.645.922,73
(+) RECEITA BRUTA			R\$	13.645.922,73	R\$	13.645.922,73	R\$	13.645.922,73	R\$	13.645.922,73	R\$	13.645.922,73
(-) PIS COFINS - NA VENDA DE ENERGIA: ISS RECEBIMENTO			-R\$	272.918,45	-R\$	272.918,45	-R\$	272.918,45	-R\$	272.918,45	-R\$	272.918,45
(-) CUSTOS INDIRETOS			-R\$	682.296,14	-R\$	682.296,14	-R\$	682.296,14	-R\$	682.296,14	-R\$	682.296,14
(-) DESPESAS - OPBX			-R\$	5.539.258,29	-R\$	5.539.258,29	-R\$	5.539.258,29	-R\$	5.539.258,29	-R\$	5.539.258,29
EBTLDA			R\$	7.151.449,84	R\$	7.151.449,84	R\$	7.151.449,84	R\$	7.151.449,84	R\$	7.151.449,84
(-) DEPRECIAÇÃO = (INVESTIMENTO TOTAL)			-R\$	5.000.000,00	-R\$	5.000.000,00	-R\$	5.000.000,00	-R\$	5.000.000,00	-R\$	5.000.000,00
(-) DESPESA FINANCEIRA - JUROS			-R\$	1.500.000,00	-R\$	1.241.732,92	-R\$	964.137,32	-R\$	665.700,54	-R\$	344.881,00
LAIR (JUORO ANTES IMPOSTO RENDA)			R\$	651.449,84	R\$	909.696,92	R\$	1.187.312,53	R\$	1.485.749,30	R\$	1.806.568,84
(-) I.R. + CONTRIBUIÇÃO SOCIAL = 34% LT (LAIR)			-R\$	221.492,95	-R\$	309.296,95	-R\$	403.686,26	-R\$	505.154,76	-R\$	614.233,41
LUCRO LÍQUIDO			R\$	429.956,90	R\$	600.399,97	R\$	783.626,27	R\$	980.594,54	R\$	1.192.335,43
(+) DEPRECIAÇÃO			R\$	5.000.000,00	R\$	5.000.000,00	R\$	5.000.000,00	R\$	5.000.000,00	R\$	5.000.000,00
(-) AMORTIZAÇÃO PRINCIPAL			-R\$	3.443.294,36	-R\$	3.701.541,43	-R\$	3.979.157,04	-R\$	4.277.593,82	-R\$	4.598.413,35
FLUXO DE CAIXA		(2.500.000)	R\$	1.986.662,54	R\$	1.898.856,53	R\$	1.804.469,23	R\$	1.703.000,72	R\$	1.593.922,08

FASE FINANCIAMENTO GASEIFICADOR												
FASE OPERACIONAL												
ANO 8	ANO 9	ANO 10	ANO 11	ANO 12	ANO 13	ANO 14	ANO 15	ANO 16	ANO 17			
R\$ 25.250.000,00	R\$ 25.250.000,00											
-R\$ 20.200.000,00	-R\$ 20.200.000,00											
R\$ 13.645.922,73	R\$ 13.645.922,73	R\$ 13.645.922,73	R\$ 13.645.922,73	R\$ 13.645.922,73	R\$ 13.645.922,73	R\$ 13.645.922,73	R\$ 13.645.922,73	R\$ 13.645.922,73	R\$ 13.645.922,73	R\$ 13.645.922,73	R\$ 13.645.922,73	R\$ 13.645.922,73
R\$ 11.824.347,65	R\$ 11.824.347,65	R\$ 11.202.013,57	R\$ 11.824.347,65	R\$ 11.824.347,65	R\$ 11.824.347,65	R\$ 11.824.347,65	R\$ 11.824.347,65	R\$ 11.824.347,65	R\$ 11.824.347,65	R\$ 11.824.347,65	R\$ 11.824.347,65	R\$ 11.824.347,65
R\$ 25.470.270,38	R\$ 25.470.270,38	R\$ 24.847.936,29	R\$ 25.470.270,38	R\$ 25.470.270,38	R\$ 25.470.270,38	R\$ 25.470.270,38	R\$ 25.470.270,38	R\$ 25.470.270,38	R\$ 25.470.270,38	R\$ 25.470.270,38	R\$ 25.470.270,38	R\$ 25.470.270,38
-R\$ 1.366.670,61	-R\$ 1.366.670,61	-R\$ 1.309.104,71	-R\$ 1.366.670,61	-R\$ 1.366.670,61	-R\$ 1.366.670,61	-R\$ 1.366.670,61	-R\$ 1.366.670,61	-R\$ 1.366.670,61	-R\$ 1.366.670,61	-R\$ 1.366.670,61	-R\$ 1.366.670,61	-R\$ 1.366.670,61
-R\$ 1.304.630,22	-R\$ 1.304.630,22	-R\$ 1.304.630,22	-R\$ 1.304.630,22	-R\$ 1.304.630,22	-R\$ 1.304.630,22	-R\$ 1.304.630,22	-R\$ 1.304.630,22	-R\$ 1.304.630,22	-R\$ 1.304.630,22	-R\$ 1.304.630,22	-R\$ 1.304.630,22	-R\$ 1.304.630,22
-R\$ 5.501.477,06	-R\$ 5.501.477,06	-R\$ 5.501.477,06	-R\$ 5.501.477,06	-R\$ 5.501.477,06	-R\$ 5.501.477,06	-R\$ 5.501.477,06	-R\$ 5.501.477,06	-R\$ 5.501.477,06	-R\$ 5.501.477,06	-R\$ 5.501.477,06	-R\$ 5.501.477,06	-R\$ 5.501.477,06
R\$ 12.247.492,48	R\$ 12.247.492,48	R\$ 16.732.724,30	R\$ 17.297.492,48	R\$ 17.297.492,48	R\$ 17.297.492,48	R\$ 17.297.492,48	R\$ 17.297.492,48	R\$ 17.297.492,48	R\$ 17.297.492,48	R\$ 17.297.492,48	R\$ 17.297.492,48	R\$ 17.297.492,48
-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00
-R\$ 3.030.000,00	-R\$ 2.508.340,91	-R\$ 1.947.557,38	-R\$ 1.344.715,09	-R\$ 696.659,62								
-R\$ 5.882.507,52	-R\$ 5.360.848,42	-R\$ 314.833,08	R\$ 852.777,39	R\$ 1.500.832,86	R\$ 2.197.492,48	R\$ 2.197.492,48	R\$ 2.197.492,48	R\$ 2.197.492,48	R\$ 2.197.492,48	R\$ 2.197.492,48	R\$ 2.197.492,48	R\$ 2.197.492,48
R\$ 2.000.052,56	R\$ 1.822.688,46	R\$ 107.043,25	R\$ 289.944,31	R\$ 510.283,17	R\$ 747.147,44	R\$ 747.147,44	R\$ 747.147,44	R\$ 747.147,44	R\$ 747.147,44	R\$ 747.147,44	R\$ 747.147,44	R\$ 747.147,44
-R\$ 3.882.454,96	-R\$ 3.538.159,96	-R\$ 207.789,83	R\$ 562.833,08	R\$ 990.549,69	R\$ 1.450.345,04	R\$ 1.450.345,04	R\$ 1.450.345,04	R\$ 1.450.345,04	R\$ 1.450.345,04	R\$ 1.450.345,04	R\$ 1.450.345,04	R\$ 1.450.345,04
-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00	-R\$ 15.100.000,00
-R\$ 6.955.454,60	-R\$ 7.477.113,69	-R\$ 8.037.997,22	-R\$ 8.640.739,51	-R\$ 9.288.794,96								
R\$ 4.262.090,44	R\$ 4.084.726,35	R\$ 6.854.312,95	R\$ 7.022.093,57	R\$ 6.801.754,71	R\$ 16.550.345,04	R\$ 16.550.345,04	R\$ 16.550.345,04	R\$ 16.550.345,04	R\$ 16.550.345,04	R\$ 16.550.345,04	R\$ 16.550.345,04	R\$ 16.550.345,04

Tabela 25 – Fluxo de Caixa Fonte: Autoria Própria, 2015

Tabela 26 – Custos de Operação e Manutenção Linha de CDR

Fonte: Autoria Própria.

CUSTOS VARIÁVEIS			
PRODUTO/SERVIÇO	CUSTO DE COMPRA (R\$)	QTDE UTILIZADA POR ANO (Un)	CUSTO TOTAL (R\$)
MANUTENÇÃO - PEÇAS	5%	R\$ 13.645.922,73	R\$ 682.296,14
INDIRETOS	5%	R\$ 13.645.922,73	R\$ 682.296,14
CAJÁRIO	R\$ -	R\$ 3.456,00	R\$ -
CONSUMÍVEIS	R\$ 8,00	74.537	R\$ 596.295,49
CONSUMO ENERGIA ELÉTRICA	R\$ 300,00	9.500	R\$ 2.850.000,00
		-	R\$ -
MÃO - DE - OBRA			
Área	Função	Qtde de funcionários	Salário base mês (s/ encargos)
ADMINISTRATIVO / FINANCEIRO	Diretores		R\$ -
	Gerente Administrativo	1	R\$ 9.000,00
	Supervisor de Produção	0	R\$ 7.000,00
	Aux. Administrativo	1	R\$ 1.500,00
INDUSTRIAL	Gerente de Produção		R\$ 4.000,00
	Supervisor de Produção	3	R\$ 3.500,00
	Auxiliar de Produção	8	R\$ 1.500,00
	Operador de Máquina	4	R\$ 1.500,00
	Catadores	0	R\$ 1.000,00
	Manutenção	4	R\$ 1.800,00
	Porteiro	4	R\$ 1.200,00
			R\$ -
CUSTOS FIXOS ANUAIS			
CONTAS	ANO	CONTAS	ANO
INDUSTRIAIS		ADMINISTRATIVOS E COMERCIAIS	
PESSOAL	R\$ 594.000,00	PESSOAL	R\$ 256.666,67
Salários e Adicionais	R\$ 486.000,00	Pró-labore	
13º Salário	R\$ 40.500,00	Salários e Adicionais	R\$ 210.000,00
Horas Extras	R\$ 40.500,00	13º Salário	R\$ 17.500,00
Férias	R\$ 13.500,00	Horas Extras	R\$ 17.500,00
Ajuda de Custo e Outras	R\$ 6.750,00	Férias	R\$ 5.833,33
Indenizações	R\$ 6.750,00	Ajuda de Custo e Outras	R\$ 2.916,67
Fardamento	R\$ -	Indenizações	R\$ 2.916,67
ENCARGOS SOCIAIS	R\$ 234.900,00	Fardamento	R\$ -
INSS/Sobre remuneração	R\$ 189.000,00	Prov. Rescisão Representantes Com.	R\$ -
FGTS/Sobre remuneração	R\$ 45.900,00	ENCARGOS SOCIAIS	R\$ 101.500,00
OUTROS BENEFÍCIOS	R\$ 93.000,00	INSS/Sobre remuneração	R\$ 81.666,67
Alimentação	R\$ 63.000,00	FGTS/Sobre remuneração	R\$ 19.833,33
Treinamento	R\$ 30.000,00	OUTROS BENEFÍCIOS	R\$ -
OUTROS CUSTOS/DESPESAS	R\$ 78.000,00	Alimentação	
Serviços prestados	R\$ -	Treinamento	
Material de segurança	R\$ 30.000,00	OUTROS CUSTOS/DESPESAS	R\$ 52.600,00
Seguros das Instalações Industriais	R\$ -	Serviços prestados	R\$ -
Manutenção Industrial	R\$ -	Material de segurança	R\$ -
Aluguel/Locação	R\$ 18.000,00	Aluguel/Locação/IPTU	R\$ -
Manutenção Veículos	R\$ 30.000,00	Manutenção Veículos	R\$ -
Manutenção Inst. Móveis e Utensílios	R\$ -	Manutenção Inst. Móveis e Utensílios	R\$ -
Depreciação/Amort/Exaustão	R\$ -	Depreciação/Amort/Exaustão	R\$ -
Viagens e Estadias	R\$ -	Viagens e Estadias	R\$ 24.000,00
Comunicação	R\$ -	Comunicação	R\$ 22.000,00
Material de Consumo	R\$ -	Material de Consumo	R\$ 6.600,00
Energia (demanda)	R\$ -	Frete sobre vendas	R\$ -
TOTAL GERAL	R\$ 999.900,00	Taxas e Tarifas bancárias	R\$ -
		TOTAL GERAL	R\$ 410.766,67

Tabela 27 – Custos de Operação e Manutenção Gaseificação

Fonte: Autoria Própria.

CUSTOS VARIÁVEIS			
PRODUTO/SERVIÇO	CUSTO DE COMPRA (R\$)	QTDE UTILIZADA POR ANO (Un)	CUSTO TOTAL (R\$)
MANUTENÇÃO - PEÇAS	5%	R\$ 12.446.681,74	R\$ 622.334,09
INDIRETOS	5%	R\$ 12.446.681,74	R\$ 622.334,09
CALCÁRIO	R\$ 120,00	R\$ 3.456,00	R\$ 414.720,00
CONSUMÍVEIS	R\$ 5,00	74.537	R\$ 372.684,68
MAO DE OBRA			R\$ 1.402.480,00
SOMA		-	R\$ 2.812.218,77
MÃO - DE - OBRA			
Área	Função	Qtde de funcionários	Salário base mês (s/ encargos)
ADMINISTRATIVO / FINANCEIRO	Diretores		R\$ -
	Gerente Administrativo	1	R\$ 9.000,00
	Supervisor de Produção	1	R\$ 7.000,00
	Aux. Administrativo	1	R\$ 1.500,00
INDUSTRIAL	Gerente de Produção	2	R\$ 4.000,00
	Supervisor de Produção	3	R\$ 3.500,00
	Auxiliar de Produção	12	R\$ 1.500,00
	Operador de Máquina		R\$ 1.500,00
	Catadores	0	R\$ 1.000,00
	Manutenção	2	R\$ 1.800,00
	Porteiro	0	R\$ 1.200,00
			R\$ -
CUSTOS FIXOS ANUAIS			
CONTAS	ANO	CONTAS	ANO
INDUSTRIAIS		ADMINISTRATIVOS E COMERCIAIS	
PESSOAL	R\$ 588.133,33	PESSOAL	R\$ 256.666,67
Salários e Adicionais	R\$ 481.200,00	Pró-labore	
13º Salário	R\$ 40.100,00	Salários e Adicionais	R\$ 210.000,00
Horas Extras	R\$ 40.100,00	13º Salário	R\$ 17.500,00
Férias	R\$ 13.366,67	Horas Extras	R\$ 17.500,00
Ajuda de Custo e Outras	R\$ 6.683,33	Férias	R\$ 5.833,33
Indenizações	R\$ 6.683,33	Ajuda de Custo e Outras	R\$ 2.916,67
Fardamento	R\$ -	Indenizações	R\$ 2.916,67
ENCARGOS SOCIAIS	R\$ 232.580,00	Fardamento	R\$ -
INSS/Sobre remuneração	R\$ 187.133,33	Prov. Rescisão Representantes Com.	R\$ -
FGTS/Sobre remuneração	R\$ 45.446,67	ENCARGOS SOCIAIS	R\$ 101.500,00
OUTROS BENEFÍCIOS	R\$ 93.000,00	INSS/Sobre remuneração	R\$ 81.666,67
Alimentação	R\$ 63.000,00	FGTS/Sobre remuneração	R\$ 19.833,33
Treinamento	R\$ 30.000,00	OUTROS BENEFÍCIOS	R\$ -
OUTROS CUSTOS/DESPESAS	R\$ 78.000,00	Alimentação	
Serviços prestados	R\$ -	Treinamento	
Material de segurança	R\$ 30.000,00	OUTROS CUSTOS/DESPESAS	R\$ 52.600,00
Seguros das Instalações Industriais	R\$ -	Serviços prestados	R\$ -
Manutenção Industrial	R\$ -	Material de segurança	R\$ -
Aluguel/Locação	R\$ 18.000,00	Aluguel/Locação/IPTU	R\$ -
Manutenção Veículos	R\$ 30.000,00	Manutenção Veículos	R\$ -
Manutenção Inst. Móveis e Utensílios	R\$ -	Manutenção Inst. Móveis e Utensílios	R\$ -
Depreciação/Amort/Exaustão	R\$ -	Depreciação/Amort/Exaustão	R\$ -
Viagens e Estadias	R\$ -	Viagens e Estadias	R\$ 24.000,00
Comunicação	R\$ -	Comunicação	R\$ 22.000,00
Material de Consumo	R\$ -	Material de Consumo	R\$ 6.600,00
Energia (demanda)	R\$ -	Frete sobre vendas	R\$ -
TOTAL GERAL	R\$ 991.713,33	Taxas e Tarifas bancárias	R\$ -
		TOTAL GERAL	R\$ 410.766,67

5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Baseado nas diretrizes da lei nº 12.305, de agosto de 2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos, a necessidade de alternativas para a recuperação energética de resíduos bem como a correta destinação final vem de encontro do que foi apresentado neste trabalho. As três metodologias de recuperação energética exemplificadas, incineração, gaseificação e aterro sanitário, demonstraram sua viabilidade técnica para este fim. Mas a realidade brasileira com seus baixos preços na recepção do resíduo, altos valores de transporte (frete) até o destino final, instabilidade no setor de energia elétrica, alta carga tributária de importação, descentralização da geração de resíduo e de consumo de energia elétrica, impossibilitam economicamente que as tecnologias de incineração largamente empregadas na Europa possam ser aplicadas aqui.

Desta forma a alternativa mais utilizada atualmente para a destinação dos resíduos sólidos é o aterro sanitário, que apesar de obter ganho econômico inicialmente com a utilização do biogás e com baixos valores iniciais de implementação, propicia uma intensa degradação de grandes extensões de área, causando desvalorização das mesmas, bem como problemas de vizinhança, seguindo de problemas de saúde pública que não são considerados nas planilhas financeiras, ou seja, custos intangíveis e incalculáveis. Outra inconsistência nesta metodologia é a incapacidade de redução do volume de resíduo que consomem diariamente novas áreas e aumentam consideravelmente os custos de manutenção após o encerramento do aterro. Deve ser ressaltado também, que a Política Nacional de Resíduos Sólidos incentiva entre outras coisas, a destinação final ambientalmente adequada com o apoio nos 3 Rs (reduzir, reaproveitar e reciclar), demonstra que a utilização de aterros sanitários está na contramão de ser uma alternativa sustentável, ambientalmente adequada, economicamente viável e socialmente justa.

Para tanto o objetivo deste trabalho foi avaliar a implantação da tecnologia de gaseificação como destinação final dos resíduos sólidos urbanos, baseado no Plano Diretor de Saneamento de Resíduos Sólidos e Manejo de Resíduos do CIVAP em Palmital-SP, o qual mostrou ser viável tecnicamente e economicamente a utilização do resíduo para a geração de energia elétrica utilizando a tecnologia de gaseificação em leito fluidizado, principalmente após seu processamento e geração do combustível derivado de resíduo – CDR.

A gaseificação proposta mostrou pelos resultados de eficiência energética nos testes de campo realizados na planta piloto da Carbogas Ltda em Mauá-SP, como uma alternativa aos aterros para destinação de RSU no país, com vantagens de reduzir muito as áreas degradadas e produtoras de chorume e possibilidade de aproveitamento energético destes passivos ambientais atendendo a crescente demanda de energia elétrica do país, bem como gerando receita ao município através da mão de obra local e dos impostos sobre o faturamento do empreendimento.

Através das referências levantadas, com os mecanismos e modelos de formação de dioxinas e furanos, bem como nos resultados obtidos na análise feita no gaseificador em Mauá-SP, verificou-se que o processo de gaseificação, libera significativamente menor taxa de *dibenzo-p-dioxinas cloradas (CDD - dioxinas)* e *dibenzofuranos clorados (CDF – furanos)* que os processos comuns de incineração de resíduos sólidos urbanos, até mesmo aqueles que apresentam sistemas de tratamento de gases de combustão. A média das emissões de dioxinas e furanos obtida nas cinzas, pelo processo de gaseificação foi abaixo de LOQ i-TEQ (*limit of quantitation toxic equivalence*), o qual se encontra dentro do valor máximo permitido pela legislação brasileira. (Análise em anexo).

O sistema de gaseificação proposto, pode contemplar diferentes características de RSU, onde variações nas frações deste material e as variáveis de controle de processo podem mudar consideravelmente o combustível gerado. A qualidade do combustível gerado nas etapas de gaseificação pode proporcionar uma perfeita combustão no final do processo de geração do vapor, evitando a formação e emissão de poluentes atmosféricos

Desta forma o processo de gaseificação de resíduos sólidos urbanos, cria uma forte e promissora vertente para o atendimento da PNRS, e de acordo com a realidade econômica brasileira, é relevante um maior empenho em pesquisa e desenvolvimento com resultados práticos no ponto de vista ambiental, de forma a dar mais segurança aos organismos licenciadores, assim como subsídios à iniciativa pública e privada, que buscam alternativas aos sistemas de destinações inadequadas de RSU estabelecidas no Brasil, visto que a resolução da ANEEL 271 de 03/07/2007 isenta 100% da TUST (tarifa de utilização do sistema de transmissão) e da TUSD (tarifa de utilização do sistema de distribuição) para usinas lixo-energia que utilizam no mínimo 50%

da energia proveniente do resíduo (lixo), o que estimula fortemente o autoprodutor e o consumidor livre investir neste setor de resíduos.

Baseado nisso o empreendimento de gaseificação do Vale do Paranapanema denominado CIVAP, visa ser o pioneiro neste desenvolvimento em escala industrial, podendo dar subsídios fundamentais para o desenvolvimento e disseminação da tecnologia de gaseificação para outras regiões do país, bem como a sua utilização para outros resíduos não contemplados neste trabalho como os resíduos industriais e hospitalares. A figura 53, mostra o início das obras de construção do empreendimento.



FONTE: Carbogas, 2015.

Figura 53 – Galpão da Linha de CDR em construção em Palmital-SP.

6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRELPE. Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil** - 2013;
- BAIN & COMPANY. **Estudo Econômico-Financeiro para a destinação final de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)**. Março 2012;
- BRASIL. ABNT NBR 10.004. **Resíduos sólidos – Classificação**.
- BRASIL. CONAMA Nº 316 – **Tratamento de Resíduos Sólidos**, 2002;
- BRASIL. CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006. **Estabelece os limites máximos de emissões de poluentes atmosféricos para fontes fixas**.
- BRASIL. Decreto 8.468, de 8 de setembro de 1976. **Dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente**;
- BRASIL. Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara: 73 p. 2012;
- BRASIL. SMA Nº 79 – **Operação e licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos em usina de recuperação de energia – URE**, 2009;
- Carbogas Ltda. **Resultados de testes práticos de gaseificação de resíduos sólidos urbanos, na planta piloto de 1 MWth**. Mauá, 2014;
- Catálogo – **Sistema de Gaseificação, da Empresa Carbogas Energia**, São Paulo 2012;
- Catálogo. **Turbinas a Vapor**, Texas Tecnologia a todo vapor, 2015.
- CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa. Seminário "**Impactos Ambientais e Sociais do Tratamento e Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos**". São Paulo, 2013;
- CENBIO – Centro Nacional de Referências em Biomassa. Estado da Arte da Gaseificação: **Comparação entre tecnologias de gaseificação de biomassa existentes no Brasil e no exterior e formação de recursos humanos na Região Norte**.: 108 p. 2002;

- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Dioxinas e Furanos**. São Paulo, 2012;
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Licenciamento Ambiental do empreendimento Companhia Vale do Paranapanema – **Projeto CIVAP de propriedade Carbogas Ltda, situado na Rodovia Raposo Tavares, km 427 no município de Palmital**. São Paulo 2014;
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Manual de Operação de aterro Sanitário em valas**. São Paulo 2010;
- CHRIS, Higman, MAARTEN, Van der Burgt. **Gasification** - 2003;
- CIVAP - Consorcio Intermunicipal do Vale do Paranapanema. **Estudo da viabilidade técnica quanto a destinação de resíduos sólidos urbanos na região administrativa do CIVP em unidades de recuperação de energia – URE**, 2012.
- CIVAP - Consorcio Intermunicipal do Vale do Paranapanema. **Plano de Saneamento dos Resíduos Sólidos Urbanos e Manejo de Resíduos**, 2009;
- CIVAP - Consorcio Intermunicipal do Vale do Paranapanema. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**, Volume I – Diagnóstico, 2013;
- COGGIOLA, Osvaldo. **A Revolução Iraniana**. Unesp 2007.
- D. PAGLIUSO, Josmar. Gaseificação: **Uma visão Geral, Tipos de gaseificadores, combustíveis, qualidades e requisitos do gás**. 2009;
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica DEN 06/08. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS**. 2008;
- FARIA, Mário. **Biogás produzido em aterros sanitários – Aspectos ambientais e aproveitamento do potencial energético**. 2010;
- FEMA - Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Análise técnica e ambiental da utilização de resíduos sólidos urbanos na produção de cimento (coprocessamento)**, Belo Horizonte, 2010;
- FONSE, Zilton José Sá – **Aproveitamento energético do lixo – uma alternativa sustentável** – 2009;

- FREITAS VARGAS, Antônio. **Gaseificação do Carvão uma Alternativa Energética Ambientalmente Limpa para o Século XXI**. Dezembro de 2001;
- Fundação Getúlio Vargas. **Estudo sobre os Aspectos Econômicos e Financeiros da Implantação e operação de Aterros Sanitários**. 2007;
- GTC KINGSPORT WORKSHOP, 2012, Kingsport. **Brief Overview of Gasification Industry**.
- INFIESTA, Roberto – **Processo de Funcionamento e Equipamento Gaseificador de Leito Fluidizado Circulante**. Patente de número PI-580 de propriedade da empresa Carbogas Ltda, 2010;
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. São Paulo, 2014;
- ITDC Energética Ltda. **Projeto Básico e Construtivo de Planta de Gaseificação de Resíduos Sólidos Urbanos e Industriais, com capacidade de 200 toneladas dia para geração de energia elétrica para o município de Entre Rios-Ba**. Bahia, 2014;
- LANZIANI, Rodolfo L. – **Estudos de caso das alternativas para recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados na região metropolitana de Campinas**. São Paulo, 2012;
- LOPES, Evandro J.. **Desenvolvimento de Sistema de Gaseificação via análise de emissões atmosféricas**. Curitiba, 2014;
- LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. **Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis**. In: (Ed.). **Biocombustíveis**. 1ª: Editora Interciência, v.1, 2012.
- LOUREIRO, Carla Alexandra Bandeira. **Avaliação da estabilidade biológica de combustível derivado de resíduo**. Lisboa, 2010;
- MARIA, Margarida João de Quiba – **Processos de Inertização e Valorização de Cinzas Volantes em Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos**. Portugal, 2005;
- MENDES, Luiz Gustavo G.. **Método de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário**. Ver. Ciênc. Exatas, Taubaté, v. 11 n.2, p. 71-76, 2005;
- MENEZES, Ricardo A. Amaral, GERLACH, José Luiz. MENEZES, Marco Antônio, ABLP – **Associação Brasileira de Limpeza: Estágio Atual da**

- incineração no Brasil** - Pública VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública 3 a 7 de Abril de 2000, Parque Barigui – Curitiba;
- MORGADO, Túlio Cintra. **Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos, aproveitamento na co-geração de Energia. Estudo para a região metropolitana de Goiânia.** Goiás, 2006;
 - ORR, D.; MAXWELL, D. **A Comparison of Gasification and Incineration of Hazardous Wastes.** USA, 2000;
 - PECORA, Vanessa. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP** – Estudo de Caso (Dissertação de Mestrado). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
 - PECORA, Vanessa; Sílvia Maria Stortini González VELÁZQUEZ; Suani Teixeira COELHO. **Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica:** Estudo de caso em São Paulo. Trabalho publicado no evento: IV Congresso Internacional de Bioenergia, 2009
 - PECORA, Vanessa; Sílvia Maria Stortini González VELÁZQUEZ; Suani Teixeira COELHO. **Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica:** Estudo de caso em São Paulo. Trabalho publicado no evento: IV Congresso Internacional de Bioenergia, 2009;
 - PGIRS. **Plano de Gestão Integrado de Resíduos Sólidos do Município de Palmital/SP.** Prefeitura de Palmital. São Paulo, 2014.
 - Revista Brasileira de Energia, Vol. 14 N° 2, 2° Sem. pp.113-125 – **Estudo Comparativo para o Tratamento de resíduos sólidos urbanos: aterros sanitários x incineração-** 2008;
 - RIBEIRO, Sergio Guerreiro – **Geração de Energia elétrica com resíduos sólidos urbanos – Usinas “Waste-to-energy”** – 2012;
 - RODRIGUES de Holanda, Marcelo. **Perspectivas da co-geração com resíduos Sólidos Municipais sob a Ótica da Gestão Ambiental.** Guaratinguetá 2003;

- Site http://carvaomineral.com.br/interna_conteudo.php. Acesso em 28/03/2015;
- Site <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=352790>. Acesso em 08/04/2015;
- Site <http://www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-da-energia-do-biogas>. Acesso em 24/03/2015.
- SOARES, Daniel H. **Gaseificação de biomassa de médio e grande porte para geração de eletricidade: uma análise da situação atual no mundo..** São Paulo, 2012.
- T.G. Miranda, Luiz – **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: Estudo de caso no município de Itanhaém - SP** - 2014;
- TAVARES, Romero Coelho – **Composição Gravimétrica: Uma ferramenta de planejamento e Gerenciamento do resíduo Urbano de Curitiba e Região Metropolitana** – 2007;
- TOLMASQUIM, Maurício Tiomno. **Fontes renováveis de energia no Brasil.** Rio de Janeiro, 2003;

7- ANEXO

Anexo 1- Plantas de Incineração Instaladas no Brasil.

Fonte: Cerqueira e Alves, 1999; Sanches, 2000

Planta	Projeto / Tecnologia	Tipo	Capac. t/ano	Resíduos processados	Tratamento dos gases	Controle de emissões	Efluentes e cinzas
BASF Guaratinguetá – SP	Inter-Uhde	Rotativo	2.700	R.S.L.P., exceção de ascaréis	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: O ₂ , CO e SO _x .	Cinzas: em aterro terceirizado
BAYER Belfort Roxo – RJ	Inter-Uhde	Rotativo	3.200	R.S.L.P. incluindo Difenilas policl.	Lavadores ácido e alcalino, separador de gotículas	Contínuo: O ₂ CO.	Cinzas: aterro ind.próprio. Líquidos: ETE
CETREL Camaçari – Bahia ISO 14.001	Sulzer	Rotativo	10.000	Resíduos líquidos organoclorados	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: O ₂ , CO ₂ e NO _x	Cinzas: depositadas em aterro próprio.
CETREL Camaçari – Bahia ISO 14.001	Andersen 2000	Rotativo	4.500	Resíduos sólidos Classe I	Coletor de pó tipo ciclone, lavadores ácido e alcalino	Contínuo: CO, O ₂ , CO ₂ , NO _x , SO ₂ , opacidade	Cinzas: depositadas em aterro próprio.
CIBA Taboão da Serra – SP	Inter-Uhde	Rotativo	3200	Res. ind. org. e inorg. Exc. ascarel e radioativos.	Lavadores ácido e alcalino, demister e ciclone	Contínuo: NO _x , SO _x , O ₂ , CO, temp., vazão, MP	Aterro próprio para 10.000 m³ de cinzas e escórias.
CINAL Marechal Deodoro – AL	CBC / Nittetu Chemical Engineering (Japão)	Câmara horizontal c/leito recíprocante	11.500	R.S.L.P. incl. PCBs e organoclorados	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: CO, CO ₂ , O ₂ , NO _x , SO _x , MP	Aterro próprio
CLARIANT Suzano – SP ISO 14.001	Inter-Uhde	Rotativo	2.700	Resíduos sólidos e pastosos	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: CO, CO ₂ , O ₂ , NO _x , SO _x , MP	Cinzas e escórias: aterro industrial em Resende (RJ) e ETE 300 m³/h
ELI LILLY Cosmópolis – SP	Inter-Uhde	Rotativo	10.400	Resíduos sólidos, líquidos e pastosos.	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: O ₂ , CO, CO ₂	Aterro próprio classe I
KOMPAC Fortaleza – Ceará	Kompac	Câmara horizontal c/leito recíprocante	10.950	Resíduos de serviços de Saúde e Industriais	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: CO ₂ , CO, O ₂ Periódico: SO _x , NO _x , HCl, HF, Cl ₂	Efl. líquidos não descartados. Cinzas e escórias: aterro industrial
RHODIA (Cubatão – SP)	Rhone-Poulanc	Rotativo	18.000	R.S.L.P., incluindo organoclorados	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: O ₂ , CO, CO ₂ e NO _x	Aterro industrial classe I
SILCON Paulínea – SP	Hoval	Leito fixo, pirolítico	3.600	Resíduos de serviços de Saúde	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: O ₂ , CO, CO ₂ e NO _x	Aterro industrial classe I
LARA - PPP São Bernardo do Campo-SP **	Indefinido	Indefinido	360.000	Resíduos sólidos Classe II	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: CO, CO ₂ , O ₂ , NO _x , SO _x , MP, dioxinas e furanos	Aterro Sanitário classe II

** em fase de estudo de viabilidade econômica, com previsão de funcionamento em 2017 fonte: LARA 2015.

Anexo 2 - Resolução CONAMA nº 264

“Art. 1º Esta Resolução aplica-se ao licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos, excetuando-se os resíduos: domiciliares brutos, os resíduos de serviços de saúde, os radioativos, explosivos, organoclorados, agrotóxicos e afins. ”

“Art. 5º O co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer deverá ser feito de modo a garantir a manutenção da qualidade ambiental, evitar danos e riscos à saúde e atender aos padrões de emissão fixados nesta Resolução. ”

“Art. 8º São considerados, para fins de co-processamento em fornos de produção de clínquer, resíduos passíveis de serem utilizados como substituto de matéria-prima e ou de combustível, desde que as condições do processo assegurem o atendimento às exigências técnicas e aos parâmetros fixados na presente Resolução, comprovados a partir dos resultados práticos do plano do Teste de Queima proposto. ”

“§ 1º O resíduo pode ser utilizado como substituto matéria-prima desde que apresente características similares às dos componentes normalmente empregados na produção de clínquer incluindo neste caso os materiais mineralizadores e/ou fundentes. ”

“§ 2º O resíduo pode ser utilizado como substituto de combustível, para fins de reaproveitamento de energia, desde que o ganho de energia seja comprovado.
”

Anexo 3 - Metodologias de Cálculo de Geração de Biogás em Aterro Sanitário

Existem diferentes métodos para calcular a quantidade de metano gerado, destes métodos que apresentam uma aproximação grosseira, considerando somente a quantidade de resíduo sólido urbano disposto no aterro, até métodos que consideram uma cinética de geração de biogás em função de três tipos importantes de parâmetros como condição climática local, concentração de nutrientes no solo e composição do resíduo. (CETESB/SMA 2003).

Uma metodologia apresentada pelo IPCC – International Panel on Climate Change, calcula a emissão de metano a partir de resíduos sólidos para países ou regiões específicas. Essa metodologia, estima a quantidade de carbono orgânico degradável no RSU, calculando desta forma a quantidade de metano que pode ser gerada, considerando diferentes de resíduos sólidos urbanos. Para isso serão necessários dados estatísticos sobre a população e o resíduo. Caso estes dados não sejam disponíveis ou até mesmo gerados, poderão ser utilizados dados padrões fornecidos pelo próprio IPCC. Esta equação é conhecida como equação de inventário do IPCC (CETESB/SMA, 2003).

$$Q_{CH4} = (Pop_{urb} * TaxaRSU * RSUf * L0) / pCH4$$

Onde:

Q_{CH4} : metano gerado [m³CH₄/ano]

Pop_{urb} : população urbana [habitantes]

$TaxaRSU$: taxa de geração de resíduos sólidos urbano por habitante por ano
[kg de RSU/habitante.ano]

$RSUf$: fração de resíduos sólidos urbano que é depositada em locais de
disposição de resíduos sólidos [%]

$L0$: potencial de geração de metano do lixo [kg de CH₄/kg de RSU]

$pCH4$: massa específica do metano [kg/m³].

Obs: O valor da massa específica do metano é 0,740 kg/m³ (CEGAS, 2005).

O potencial de geração de metano a partir do lixo (L0) pode ser obtido pela metodologia apresentada em IPCC (1996), que segue a equação;

$$L0 = FCM * COD * CODf * F * (16/12)$$

Onde:

L0: potencial de geração de metano do RSU [kg de CH₄/kg de RSU];

FCM: fator de correção de metano [%];

COD: carbono orgânico degradável [kg de C/kg de RSD];

COD_f: fração de COD dissociada [%];

F: fração em volume de metano no biogás [%];

(16/12): fator de conversão de carbono em metano [kg de CH₄/kg de C].

Conforme CETESB/SMA (2003), o FCM varia em função do tipo de local. O IPCC define quatro categorias de locais: Aterros Inadequados, Aterros Controlados, Aterros Adequados (Aterro Sanitário) e Aterros Sem Classificação e para cada uma das categorias o FCM apresenta um valor diferente conforme apresentado na tabela 1.

Tabela 1 – Valores para o FCM

Fonte: IPCC, 1996

Tipo de Local de Disposição	FCM
Lixão	0,4
Aterro Controlado	0,8
Aterro Sanitário	1,0
Locais sem categoria	0,6

Para o cálculo do carbono orgânico degradável (COD), devem ser seguidos os valores para diferentes componentes do RSU, conforme tabela 4.

Tabela 2 – Teor de carbono orgânico degradável

Fonte: BIRGEMER; CRUTZEN, 1987

Componente	Porcentagem COD (kg)
Papel e Papelão	40
Resíduos de parques e jardins	17
Restos de alimentos	15
Tecidos	40
Madeira	30

Desta forma para o cálculo do COD total do resíduo, deve-se fazer a média ponderada conforme equação abaixo;

$$CDO = (0,4 * A) + (0,17 * B) + (0,15 * C) + (0,4 * D) + (0,3 * E)$$

Onde:

A = fração de Papel e Papelão no RSU

B = fração de Resíduos de parques e jardins no RSU

C = fração de Restos de alimentos no RSU

D = fração de Tecidos no RSU

E = fração de Madeira no RSU

Seguindo, deve-se fazer o cálculo do CDO_f, que segundo Birgemer & Crutzen (1987), indica a fração de carbono que está disponível para a decomposição bioquímica.

$$\text{CDO}_f = 0,014 * T + 0,28$$

Onde:

T = temperatura na zona anaeróbica em °C

Existem outras metodologias para o cálculo de geração do biogás como é o caso da USEPA – United States Environmental Protection Agency, onde está é conhecida como equação de inventário da USEPA (USEPA, 1997).

$$Q = \text{População} * \text{Taxa RSU} * \text{RSU}_f * 0,45 * F$$

Onde:

Q = metano gerado [m³/ano];

População = número de habitantes atendidos pelo aterro [habitantes];

Taxa RSU = taxa de geração de resíduos sólidos por habitante por ano [kg RSU/habitantes.ano];

RSU_f = fração de resíduos sólidos coletados que é depositada nos aterros [%];

0,45 = volume de biogás gerado por 1kg de resíduo sólido [m³ biogás/kg RSU];

F = fração de metano no biogás [%].

Para uma avaliação mais detalhada da geração de metano em aterros sanitários, recomendam-se métodos que levem em consideração a geração de biogás ao longo dos anos, por meio de uma aproximação da cinética de decomposição do resíduo. Ambos os órgãos citados, IPCC e USEPA possuem métodos para este fim, sendo eles: Método de Projeto e Método de Decaimento de Primeira Ordem.

Os dois métodos utilizam em seus cálculos uma constante denominada decaimento (k), cuja função está relacionada a disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e principalmente umidade. A tabela 3 demonstra os valores de k conforme a precipitação anual.

Tabela 3 – valores sugeridos para k Fonte: WORLD BANK, 2003

Tempo (anos)	Valor de k	Tempo (anos)	Valor de k
0-1	0,1	11-12	0,05
1-2	0,08	13-14	0,04
2-3	0,06	15-16	0,03
3-4	0,05	17-18	0,02
4-5	0,04	19-20	0,01
5-6	0,03	21-22	0,01
6-7	0,02	23-24	0,01
7-8	0,02	25-26	0,01
8-9	0,01	27-28	0,01
9-10	0,01	29-30	0,01

O Método de Projeto é recomendado para aterros sanitários em fase de projeto, pois não há dados reais do fluxo de resíduos. Desta forma este método divide-se em duas fases, durante a vida útil do aterro e fechamento do aterro.

Com isso divide-se os cálculos de geração em duas etapas.

$$Q = F * R * L0 * (e^{-k * c} - e^{-k * t})$$

Onde:

Q = metano gerado [m3/ano];

F = fração de metano no biogás [%];

R = quantidade média de resíduos depositados durante a vida útil do aterro [kg RSU/ano];

L0 = potencial de geração de biogás [m3 de biogás/kg RSU];

k = constante de decaimento [ano-1];

c = tempo decorrido desde o fechamento do aterro [ano];

t = tempo decorrido desde a abertura do aterro [ano];

Enquanto o aterro estiver aberto, o termo de cinética $e^{-k * c}$ será igual a 1. Após seu fechamento este termo deverá ser considerado. Desta forma a equação acima demonstrada será:

$$Q = F * R * L0 * (1 - e^{-k * t})$$

Para o método de decaimento de primeira ordem, considera a geração de metano por uma quantidade de resíduo depositada ano a ano, ou seja, para o cálculo total de metano gerado no ano “X” deve-se calcular o metano do ano e questão mais a somatório dos anos anteriores.

$$Qt = F * Rx * k * L0 * e^{-k * (X - x)}$$

Sendo:

QT = metano gerado no ano X [m3/ano];

F = fração de metano no biogás [%];

Rx = quantidade de resíduo depositado no ano [kg];

k = constante de decaimento [ano-1];

L0 = potencial de geração de biogás [m³ de biogás/kg RSU];

X = ano atual;

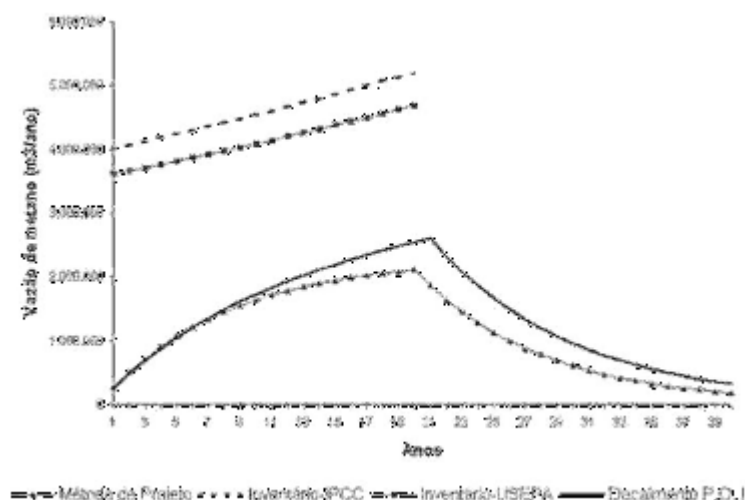
x = ano de deposição do resíduo.

Para melhor exemplificar os diferentes métodos mencionados os dados de um caso de geração de metano em um aterro com as características apresentadas na tabela 4 , serão plotados em um gráfico para comparação demonstrados na figura 1.

Tabela 4 – Dados de um aterro sanitário fictício.

Fonte Unesp 2005.

Ano de Abertura	1
Ano de Fechamento	20
Tempo após fechamento	20 anos
População de atendimento	100.000 habitantes
Taxa de crescimento populacional	1,38%
Taxa de geração de resíduo "per capita"	0,5 kg/habitante dia
Taxa de deposição em aterro	88%
Constante de decaimento	0,025/ano
Potencial de geração de biogás	0,25 m ³ de biogás / kg RSU
Temperatura anaeróbica	50 °C
Fator de conversão de metano	1,0 – aterro sanitário
Fração de metano no biogas	50%



FONTE: Unesp, 2005.

Figura 1 – Geração de metano pelos diferentes métodos de cálculo

Em 2006 a CETESB, disponibilizou para consulta o software *Biogás, geração e uso energético – aterros, versão 1.0*¹ (CETESB, Secretaria do Meio Ambiente, Ministério da Ciência e Tecnologia, 2006). O programa de computador faz parte dos produtos desenvolvidos pelos convênios firmados entre o Governo Federal, por intermédio do Ministério da Ciência e Tecnologia e o Governo do Estado de São Paulo, por intermédio da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB.

¹ O programa de computador faz parte dos produtos desenvolvidos pelos convênios firmados entre o Governo Federal, por intermédio do Ministério de Ciências e tecnologia e o Governo do Estado de São Paulo, por intermédio da Secretaria de Estado do Meio ambiente e da Companhia de Tecnologia de saneamento Ambiental – CETESB.

Anexo 4 – relatório de Ensaio das Cinzas de Gaseificação de RSU