

RENAN YUDY HIDANI

**Estudo técnico-econômico de geração de energia elétrica a partir
dos resíduos gerados nas instalações da CEAGESP.**

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

São Paulo

2017

RENAN YUDY HIDANI

**Estudo técnico-econômico de geração de energia elétrica a partir
dos resíduos gerados nas instalações da CEAGESP.**

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

Área de Concentração: Biomassa

Orientadora: Profa. Dra. Suani Teixeira
Coelho

São Paulo

2017

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.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, agradeço pelo apoio e incentivo durante o curso, me possibilitando um desenvolvimento pessoal e intelectual, agradeço também pela paciência nos finais de semana, tempo que não foi possível desfrutar em família.

À professora Suani Coelho, pela orientação e pelo tempo dedicado a me auxiliar na conclusão desse trabalho.

RESUMO

O tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e a sua destinação adequada correspondem a um problema comum no Brasil, principalmente em médios e pequenos municípios, que não dispõem de recursos nem tecnologias adequadas para sua disposição. O problema é também importante quando se refere a resíduos de alimentos. Estudos da FAO (2017) indicam que um terço de todo alimento produzido no mundo é desperdiçado por ano, e que aproximadamente 3,3 bilhões de toneladas de dióxido de carbono são emitidas devido a este desperdício. Ainda de acordo com FAO (2017), aproximadamente 80% de todo este desperdício de alimentos corresponde às operações de transporte, comercialização, abastecimento e manuseio. A CEAGESP (Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo) na cidade de São Paulo, por ser o maior centro de distribuição alimentício do Brasil, é onde ocorre a maior parte do desperdício de alimentos.

Neste contexto, este estudo analisa os possíveis processos para tratamento dos resíduos descartados na CEAGESP, com objetivo de gerar energia elétrica para venda à concessionária local. Considerando a quantidade (não tão elevada) de 140 toneladas por dia de resíduos sólidos, nem todos os métodos podem ser aplicados, em particular a incineração, porque não se consegue atingir uma potência mínima de geração de energia que permita a viabilidade econômica do empreendimento. Para se tornar viável financeiramente, seria necessário captar mais resíduos do estado de São Paulo, além daqueles disponíveis na CEAGESP.

Segundo as conclusões deste trabalho, as tecnologias mais indicadas são a gaseificação, com um potencial de potência instalada de 3 MW e geração de energia elétrica anual de 19.284 MWh. Há também as opções de tratamento mecânico biológico (TMB), com uma potência instalada prevista de 1 MW e uma geração de 6.737 MWh por ano ou o modelo de aterro sanitário já utilizado atualmente; neste caso, com os resíduos gerados e dispostos em aterro, poderia se ter, 1 MW de potência instalada e uma geração

de energia elétrica de 6.936 MWh por ano. Mas este modelo de disposição em aterro, certamente não terá perspectivas futuras, caso entre em vigor a PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos) no país, como previsto na Lei nº 12.305/10.

ABSTRACT

Municipal Solid Waste (MSW) treatments and MSW proper destination both correspond to a common problem in Brazil, mainly in medium and small municipalities that do not have adequate resources or technologies to this disposal. This problem is particularly important when we consider food waste. FAO (2017) indicates that one-third of all food produced in the world is wasted per year, and that approximately 3.3 billion tonnes of carbon dioxide is emitted due to this food waste. Approximately 80% of all food waste corresponds to the following operations: transportation, marketing, supply and handling (FAO, 2017). CEAGESP, in the city of São Paulo is where large amounts of food waste occur, because it is the largest food distribution center in Brazil.

In this context, this study analyzes the possible waste-to-energy processes for the treatment of CEAGESP waste, aiming to generate electricity to be sold to the local utility. Considering the (not so high) amount of 140 tons per day of solid waste, it is not economically feasible the use of some waste-to-energy technologies, such as incineration. It is not possible to reach the minimum power potential to makes the incineration plant economically feasible. In order to allow a large size for the incineration plant, to allow the economic feasibility, it would be necessary to collect additional residues from other locations, in addition to those available in CEAGESP.

The most indicated technologies, based on this study, are gasification, with an installed capacity of 3 MW and an annual electricity potential generation of 19,284 MWh. The Mechanical Biological Treatment (MBT) presents a potential installed power of 1 MW and a generation of 6,737 MWh per year and, if disposed in landfills, as used currently, it could have a power of 1 MW and an electric power generation of 6,936 MWh per year. However, the landfill disposal certainly does not have future prospects, considering the start-up of the National Policy for Solid Residues (PNRS, in Portuguese), as provided for in Law No. 12,305/10.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Esquema de Usina de Incineração	41
Figura 3.2 Modelos de Gaseificador Concorrente e Contracorrente	47
Figura 3.3 Modelo de Gaseificador de Leito Fluidizado	49
Figura 3.4 Ilustração de um Aterro Sanitário	51
Figura 3.5 Secções e Etapas do Aterro Sanitário	52
Figura 4.1 Participação das renováveis no consumo de energia no mundo em 2015	59
Figura 4.2 Evolução do consumo final de energia no mundo comparado com a biomassa tradicional e as fontes renováveis modernas	60
Figura 4.3 Empregos Gerados por Fonte de Energia Renovável	61
Figura 4.4 Comparação dos Usos Energéticos Finais da Biomassa	61
Figura 4.5 Fluxograma da PNRS	64
Figura 5.1 Unidades Ativas de Armazéns da CEAGESP	68
Figura 5.2 Unidades Ativas de Entrepósitos da CEAGESP	69
Figura 5.3 Lixo Gerado e Reciclado pela CEAGESP	70
Figura 5.4 Lixo Descartado na CEAGESP	71
Figura 5.5 Banco de Alimentos da CEAGESP	72
Figura 5.6 Energia Projetada para as opções tecnologias do Plano Paulista de Energia ...	75
Figura 5.7 Consumo de Energia na CEAGESP	76
Figura 5.8 Projeto Arquitetônico do NESP	78
Figura 6.1 VLP descontado dos 3 métodos	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 Tecnologias de Aproveitamento Energético de RSU Disponíveis Comercialmente.....	16
Tabela 1.2 Vantagens e Desvantagens dos Processos de Aproveitamento Energético de RSU	17
Tabela 1.3 Produção e destinação dos RSU nas diferentes regiões do Brasil	18
Tabela 2.1 Aproveitamento energético de RSU com o processo de incineração (2000t/dia de RSU)	31
Tabela 2.2 Dados do Tratamento pela Gaseificação com 2000 t/dia	32
Tabela 2.3 Dados de VPL com 2000 t/dia	33
Tabela 2.4 Análise técnico-econômica do aproveitamento energético dos RSU do Projeto CIVAP por Gaseificação	34
Tabela 3.1 Limite de Emissão para Atmosfera, Substâncias Orgânicas, de Furanos e Dioxinas	39
Tabela 3.2 Limite de Emissão para Atmosfera em outros países	40
Tabela 3.3 Comparação entre Gaseificador de Leito e Leito Fluidizado	49
Tabela 3.4 Tabela de Especificação do biometano oriundo de aterro e tratamento de esgoto	54
Tabela 3.5 Principais Vantagens e Desvantagens do TMB	57
Tabela 4.1 Principais parâmetros de um estudo de caso para incineração de RSU em São Paulo	66
Tabela 5.1 Comparação dos Resíduos da CEAGESP de 2011 até 2015	69
Tabela 5.2 Volume de Alimentos do BCA de 2011 até 2015	71
Tabela 5.3 Composição Gravimétrica dos resíduos da CEASA – Goiás	73
Tabela 5.4 Aproveitamento Energético dos RSU – Plano Paulista de Energia	74
Tabela 6.1 Cálculo do Poder Calorífico Inferior dos resíduos na CEAGESP	80

Tabela 6.2 Dados do estudo técnico financeiro considerando aterro sanitário	82
Tabela 6.3 Dados do estudo técnico financeiro considerando incineração	84
Tabela 6.4 Resultados de estudos técnico financeiros considerando gaseificação	86
Tabela 6.5 Dados do estudo técnico financeiro considerando TMB	89
Tabela 7.1 Políticas Estaduais voltados para Recuperação Energética com RSU	93
Tabela 7.2 Projetos em Andamento na CEAGESP	94
Tabela 7.3 Políticas Estaduais voltados para Fontes Renováveis	95

LISTA DE SIGLAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos

Especiais

BCA – Banco CEAGESP de Alimentos

CDR – Combustível Derivado de Resíduo

CEAGESP – Companhia de Entrepasto e Armazéns Gerais de São Paulo

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária

EIA – Estudo de Impacto Ambiental

EPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas

FAO – Organização das Nações Unidas de Agricultura e Alimentos

GEE – Gases do Efeito Estufa

IRENA – Agência Internacional de Energia Renovável

NESP – Novo Entrepasto de São Paulo

NT – Nota Técnica

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCS – Poder Calorífico Superior

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

SEE/SP – Secretária de Energia

PIB – Produto Interno Bruto

PPE – Plano Paulista de Energia

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

URE – Unidade de Recuperação de Energia

Tep – Tonelada Equivalente de Petróleo

VPL – Valor Presente Líquido

Sumário

1. Introdução	15
1.1. Objetivos do trabalho	20
2. Revisão Bibliográfica	21
2.1. Estudo de Caso da Região Metropolitana de Campinas	25
2.2. Estudo de Caso de Itanhaém	28
2.3. Estudo de Caso da Cooperativa Intermunicipal	29
2.4. Estudo de Caso do Consórcio CIVAP – Consórcio do Vale do Paranapanema	30
2.5. Estudo de Caso dos Pequenos e Médios Municípios de São Paulo	35
3. Tecnologias comercialmente disponíveis para aproveitamento energético de resíduos sólidos	36
3.1. Incineração	36
3.2. Gaseificação	42
3.2.1. Leito Fixo	46
3.2.2. Leito Fluidizado	48
3.3. Digestão Anaeróbica e Aterro Sanitário	50
3.4. Tratamento Mecânico Biológico	56
4. Cenário atual dos RSU no Brasil e no mundo	58
4.1. Biomassa no Brasil e no mundo	58
4.2. Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e o caso do Estado de São Paulo	63
5. Estudo de Caso da CEAGESP	68
5.1. O Aproveitamento Energético dos Resíduos Gerados na CEAGESP	73
5.2. O novo projeto NESP e a sinergia com uma URE	77
6. Avaliação Técnico-econômica de uma URE na CEAGESP	79
7. Análise de Políticas Públicas para RSU	92
8. Conclusões	96

ANEXO I – Memorial de Cálculo do Estudo de Viabilidade Técnico Financeira da CEAGESP
.....104

O estado de São Paulo possui o maior entreposto de comercialização de produtos agrícolas do Brasil. Os resíduos gerados na Companhia de Entrepostos e Armazéns Gerais de São Paulo (CEAGESP), por possuir o maior volume comercializado, é também a que sofre maiores dificuldades para o descarte adequado dos resíduos. A CEAGESP comercializou em 2015, um volume aproximado de 2,8 milhões de toneladas de alimentos, sendo descartados 45.587 toneladas de resíduos sólidos. De acordo com CEAGESP (2016), a maior parte desses resíduos são encaminhados para aterros sanitários. O maior problema é que os resíduos descartados não passam por uma coleta seletiva, o que aproveitar os resíduos recicláveis e reutilizáveis, reduzindo o volume encaminhado para os aterros sanitários. Uma possível solução seria o aproveitamento desses resíduos em Unidades de Recuperação Energética (UREs), aproveitando o seu potencial energético para geração de energia elétrica.

Existem diversas UREs fora do Brasil que já operam com o tratamento de RSU, reduzindo os resíduos encaminhados para os aterros sanitários e aumentando a geração de energia elétrica, gerando empregos e melhorando a qualidade de vida. Em São Paulo já está em construção uma URE em Barueri, com perspectiva de produzir 20 MW a partir de 825 toneladas por dia de RSU com o tratamento de incineração (HAZTEC, 2017).

De acordo com LEITE (2014), a construção dos aterros na maioria dos países desenvolvidos não é permitida, sendo incentivados os processos de aproveitamento energético, em particular o processo de incineração; esta tecnologia, na verdade, se viabiliza devido a políticas especiais, em particular o preço atrativo de venda da energia elétrica através de tarifas especiais (*feed-in-tariffs*) e os outros possíveis usos, como a geração de energia térmica.

Existem outros métodos de tratamento de RSU, como a compostagem e vermicompostagem, que é o tratamento dos resíduos orgânicos por processos biológicos, com a produção de fertilizantes orgânicos, mas na compostagem não há aproveitamento energético como em outros métodos de destinação dos RSU. URATANI, PALMA e SCHULTZE (2014) analisaram as vantagens técnico-econômicas da compostagem do material coletado no centro de distribuição de São Paulo, com o transporte dos resíduos orgânicos ao município de Jaguariúna para serem processados e comercializados.

No presente estudo, por não se tratar de um processo de geração de energia elétrica, a compostagem e vermicompostagem não serão analisadas, pois neste caso o objetivo é analisar os processos de aproveitamento energético: incineração, gaseificação e aterro sanitário (com aproveitamento energético do biogás produzido).

A Tabela 1.1 resume os principais processos térmicos e biológicos para a recuperação energética dos RSU.

Tabela 1.1 – Tecnologias de Aproveitamento Energético de RSU Disponíveis Comercialmente

Processos Térmicos	Processos Biológicos
Incineração	Aterro Sanitário (biodigestão da matéria orgânica)
Gaseificação	Biodigestor

Fonte: Autoria Própria a partir de COELHO (2016).

Cada processo de aproveitamento energético de RSU possui vantagens e desvantagens e sua escolha depende basicamente da quantidade e composição dos resíduos a serem tratados.

Tabela 1.2 - Vantagens e Desvantagens dos Processos de Aproveitamento Energético de RSU

Processo	Vantagens	Desvantagens
Aterro Sanitário	Possibilidades de geração de crédito de carbono (conversão do metano em CO ₂) Tecnologia disponíveis para pequenos/médios municípios	Emissão não controlada de GEE, quando não há captação do biogás gerado Dificuldade de novas áreas para aterros e proibição quando a PNRS entrar em vigor Motores para biogás com elevada emissão NOx Microturbinas para biogás ainda pouco utilizadas e de alto investimento
Incineração	Possibilidade de geração de energia térmica e elétrica Produção de energia em grande escala	Necessidade de rígido controle das emissões poluentes (dioxinas, furanos e metais pesados, entre outros) Elevado investimento Dificuldade de viabilidade econômica para pequenos e médios municípios (abaixo de 500t/d de RSU)
Tratamento Mecânico Biológico	Retirada da fração orgânica dos RSU para biodigestão Possibilidade de comercialização dos resíduos recicláveis Minimização da emissão de GEE	Dificuldade na comercialização dos compostos gerados na coleta e separação (nem todos os produtos tem mercado para comercialização)
Gaseificação	Uso em pequenos e médios municípios Não há formação de organoclorados Viabilidade econômica	Necessidade de produção de CDR Necessidade de limpeza do gás de síntese para retirada do alcatrão e outros contaminantes antes da alimentação no sistema de geração de energia Poucas plantas comerciais para biomassa principalmente RSU; uma planta em Minas Gerais (Furnas – www.furnas.com.br) e uma em SP (Paranapanema – www.civap.com.br)

Fonte: Adaptado de COELHO (2016).

Verifica-se que o tratamento mecânico biológico possui vantagens particulares, como discutido a seguir nesse trabalho, como a separação dos resíduos em orgânicos e não orgânicos, otimizando o aproveitamento de cada tipo de resíduos. Os resíduos orgânicos podem ser tratados pela compostagem ou por biodigestores, e os resíduos não orgânicos podem ser reciclados ou tratados por processos térmicos, visando a geração de energia elétrica.

Os tratamentos de aterro sanitário, incineração, tratamento mecânico biológico e gaseificação serão abordados de forma mais detalhada no capítulo três, considerando as tecnologias comercialmente disponíveis para estes tratamentos de resíduos sólidos.

Na Tabela 1.3, elaborada a partir dos dados fornecidos pela ABRELPE (2016), pode-se notar que de 2014 para 2015 houve um aumento generalizado na geração de RSU no Brasil, sendo que a maior parcela do aumento de RSU em 2015 foi encaminhada para aterros sanitários. Isso pode ser verificado pelo aumento na disposição final em aterros sanitários, que foi de 2.3%, comparado com o aumento médio na geração de RSU no país, que foi de 1.8%. Entretanto quando a PNRS entrar em vigor (conforme previsto para 2018-2021, dependendo do tamanho do município), a disposição direta em aterro sanitário, aterro controlado e lixões será proibida.

Tabela 1.3 – Produção e destinação dos RSU nas diferentes regiões do Brasil

Regiões	RSU em 2014 (t/dia)	RSU em 2015 (t/dia)	Aumento (%)
Norte	12.458	12.692	1.9%
Nordeste	43.330	43.894	1.3%
Centro-Oeste	15.826	16.217	2.5%
Sudeste	102.572	104.631	2.0%
Sul	21.047	21.316	1.3%
Média	39.047	39.750	1.8%
Disposição Final dos RSU			
Aterro Sanitário	113.975	116.631	2.3%
Aterro Controlado	47.272	47.942	1.4%
Lixão	33.986	34.177	0.6%

Fonte: Adaptado de ABRELPE (2016).

O aumento na geração de RSU verificado na Tabela 1.3 ocorreu pela mudança nos hábitos de consumo e melhoria na qualidade de vida da população; como a expectativa de vida vem aumentando, a população brasileira tem gerado mais resíduos (ABRELPE, 2016).

No Brasil, a geração de RSU e seu tratamento correto estão diretamente relacionados com a desigualdade social. Nas regiões do Norte e Nordeste, que representam uma parcela menor do produto interno bruto (PIB), em mais de 50% dos municípios não há coleta seletiva, enquanto que no Sudeste e no Sul este valor é de aproximadamente 20% (ABRELPE, 2016).

Segundo IRENA¹ (2017), o valor investido globalmente em P&D para tratamento de RSU no mundo é de aproximadamente 2% em relação a todo investimento global em energias renováveis. Este valor não é significativo quando comparado com outras fontes de energia renovável, como solar e eólica, que representam quase 90% de todo investimento.

Isso demonstra que é necessário aumentar o investimento em novas tecnologias para o tratamento de RSU uma vez que, além da possibilidade de geração de energia elétrica e térmica, tem-se uma destinação correta para os resíduos gerados.

Visando contribuir para a discussão do problema, este trabalho se propõe a estudar um caso específico, que é a destinação de resíduos dentro das instalações da CEAGESP. O aproveitamento desses resíduos pode ocorrer através de um tratamento térmico ou biológico, reduzindo o volume de resíduos, sendo os resíduos finais encaminhados para os aterros sanitários.

Este texto se divide em oito capítulos. Após esta introdução, segue-se no capítulo 2 com uma revisão bibliográfica, onde são abordados os estudos de casos de LANZIANI (2013), De Castro (2016), INFUESTA (2015), MIRANDA (2014), NETO (2013) e CALVE (2016); em seguida, no capítulo 3 é apresentada uma revisão dos processos de aproveitamento energético de RSU (térmico e biológico). No capítulo 4 é discutida a situação da biomassa no mundo e no Brasil e, no capítulo 5, é analisada a situação financeira e o potencial de geração elétrica dos resíduos da CEAGESP; em seguida, no capítulo 6 é realizado o estudo de viabilidade técnico-econômica dos resíduos na CEAGESP. Finalmente, o capítulo 7 apresenta uma análise das propostas político-econômicas para a geração de energia elétrica através da biomassa, seguido da conclusão do trabalho realizado, com propostas para trabalhos futuros.

¹ A IRENA – International Renewable Energy Agency - é uma organização internacional que suporta através de cooperativas entre países, a transição do uso da energia para modelos sustentáveis (IRENA,2017 – www.irena.org)

1.1 Objetivos do trabalho

Este trabalho tem como objetivo analisar os processos comercialmente disponíveis no Brasil para o tratamento dos resíduos sólidos e, a partir da avaliação do potencial de geração de energia dos resíduos da CEAGESP, selecionar a melhor rota para disposição final e aproveitamento energético destes resíduos.

Em uma Unidade de Recuperação Energética de resíduos (URE), através do processo adequado de aproveitamento energético, pode-se gerar energia elétrica, além de contribuir para o saneamento básico e para a criação de empregos. Para a análise de projetos, foi realizado um estudo da viabilidade técnica e econômica das tecnologias disponíveis comercialmente, visando permitir o desenvolvimento de um futuro projeto básico.

Os processos de destinação e aproveitamento energético de resíduos, aqui selecionados para o estudo de viabilidade técnico-econômica foram os seguintes,

- incineração,
- tratamento mecânico biológico,
- aterro sanitário, e
- gaseificação.

Diversos estudos já foram realizados em relação ao aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos; nesse trabalho foram selecionados para análise os estudos de LANZIANI (2013), De Castro (2016), INFIESTA (2015), MIRANDA (2014), NETO (2013) e CALVE (2016).

O grande problema levantado pela maioria dos estudos é que, para o melhor aproveitamento desses resíduos, há necessidade de políticas governamentais adequadas, que incentivem a reciclagem, reutilização, redução (também conhecido como 3 Rs) e a destinação adequada. Mesmo após a publicação da Lei nº 12.305, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a maioria dos RSU são destinados a aterros sanitários (em grandes volumes), mas há ainda muitos resíduos destinados a lixões. Outra barreira frequente é a logística: os resíduos gerados necessitariam de um local relativamente próximo da fonte de geração, ou de locais estratégicos para serem tratados corretamente.

Uma solução adotada pelos países industrializados para o tratamento dos RSU é a construção de unidades de incineração ou gaseificação, porque são modelos de UREs adequados para o problema de espaço físico. Estes países incentivam esses tratamentos com políticas de incentivo; as taxas cobradas incentivam e educam a comunidade para realizar a reciclagem e assim reduzir a quantidade gerada.

Um *lixão* é qualquer local que receba de forma inadequada os resíduos urbanos, sem o controle dos impactos ambientais e prejudiciais à saúde pública. De acordo com ABRELPE (2016), *lixão* é o “local no qual ocorre disposição indiscriminada de resíduos sólidos no solo, com nenhuma ou, no máximo, algumas medidas bem limitadas de controle das operações e proteção do ambiente do entorno”.

URATANI, PALMA, SCHULTZE (2014) analisam o tratamento dos resíduos sólidos urbanos da CEAGESP através da compostagem e vermicompostagem; por se tratar de um tratamento biológico diferente dos aterros sanitários, não ocorre a geração de biogás, mas sim de material rico em nutrientes para a utilização na agricultura. A recomendação do estudo é que os resíduos sejam transportados para fora da cidade de São Paulo, visto que não há espaço nas proximidades da CEAGESP para este tratamento. Entretanto, essa ação de transporte dos RSU apresenta elevado consumo de combustíveis fósseis através de caminhões e maquinário (diesel), tornando esta solução dos resíduos pela compostagem desafiadora.

Uma outra grande barreira está relacionada ao investimento inicial necessário para a construção de usinas para processar os resíduos; caso seja um investimento público, há grande probabilidade de que seja questionado se o investimento é adequado para a sociedade, visto que outras fontes renováveis são mais populares atualmente como solar e eólica (no entanto há que se considerar a importância da destinação adequada e a sinergia entre o aproveitamento energético e o saneamento básico).

LANZIANI (2013) analisa um outro ponto em relação ao orçamento público; com a queda na arrecadação pelo poder público em anos recentes, os investimentos nesta área acabam sendo vistos como menos relevantes, comparados com as outras necessidades do país como saúde e educação.

Caso fosse utilizado um investimento privado, verifica-se a existência de outras barreiras; devido à falta de incentivos favoráveis, muitos investimentos nacionais e estrangeiros acabam migrando para as energias mais rentáveis. A Tabela 2.1 lista as vantagens e desvantagens nos processos de tratamento dos RSU.

Na seleção da tecnologia mais adequada, é importante – como mencionado

anteriormente – analisar as vantagens e desvantagens de cada processo de tratamento dos RSU atualmente comercializados, como ilustrado na tabela 1.2.

Como resumido na tabela 1.2, a tecnologia de disposição em aterro sanitário já é dominada no Brasil e bastante utilizada, porém encontra dificuldade na seleção de novas áreas, não apenas pelas exigências ambientais como também pela reação contrária da população local. Além disso, a nova PNRS prevê que não será possível destinar o lixo aos aterros sem tratamento prévio. Outras tecnologias como a incineração, reduzem o volume dos resíduos encaminhados para aterros sanitários, mas o seu investimento inicial é elevado e só se viabiliza em unidades de grande porte (acima de 500 t/d de RSU), em virtude da necessidade de limpeza dos gases para cumprir as exigências ambientais (emissões de dioxinas e furanos, metais pesados e outros poluentes).

A gaseificação é um processo adequado para quantidades menores de RSU, mas necessita o tratamento prévio de conversão dos RSU em CDR – Combustível Derivado de Resíduo; é uma opção interessante para pequenos e médios municípios, ou em consórcios municipais, mas não existem muitas plantas instaladas para processamento de RSU.

Existe o projeto de Furnas em andamento, onde através da parceria entre as empresas Furnas e Carbogás, será construída em Boa Esperança, Minas Gerais, uma usina de aproveitamento energético para processar 47 toneladas de RSU através da gaseificação por leito fluidizado, com possibilidade de gerar aproximadamente 8.000 MWh/ano (Secretaria de Energia e Mineração, 2017). Outra planta baseada em gaseificação é apresentada por INFIESTA (2015), onde um consórcio intermunicipal é proposto um tratamento dos RSU gerados, utilizando-se de um gaseificador acoplado a um ciclo a vapor para tratamento de 162.000 toneladas de resíduos por ano.

O tratamento mecânico biológico (TMB), por se tratar de um processo que combina as

tecnologias de aproveitamento térmico e biológico, parece ser o tratamento mais completo, já que, com o tratamento mecânico dos resíduos, tem-se a separação entre material orgânico e não orgânico.

Se não for usado nenhum tratamento térmico (incineração ou gaseificação), o TMB não reduz o volume final dos resíduos de forma expressiva, mas o objetivo de seu uso está relacionado em minimizar o impacto ambiental dos resíduos que são biodegradáveis (LANZIANI, 2014).

Se os resíduos não orgânicos forem enviados para um tratamento térmico (incineração ou gaseificação, dependendo da quantidade), após a devida reciclagem os rejeitos finais do processo térmico são então encaminhados para o aterro sanitário. Por sua vez, os resíduos orgânicos passam por uma triagem fina e separação magnética, sendo depois encaminhados para a biodigestão, onde é gerado o biogás. Após a prensagem do substrato é separado a fração líquida da sólida, onde é possível obter os compostos orgânicos e os fertilizantes líquidos; a produção de biogás pode ser utilizada para geração de energia elétrica e/ou térmica (COELHO, 2016).

A seguir são apresentados e comentados alguns estudos de caso na literatura que analisaram o aproveitamento energético de RSU em São Paulo.

2.1 Estudo de Caso da Região Metropolitana de Campinas

LANZIANI (2013) analisa as possíveis soluções para a destinação dos resíduos na Região Metropolitana de Campinas (RMC), considerando a incineração, o TMB e o modelo de aterro sanitário.

A RMC é composta por 19 municípios onde seriam coletados os RSU gerados, e o estudo conclui que o local mais adequado para a construção de uma URE seria entre os municípios de Campinas e Paulínia, sendo que Paulínia já possui um aterro sanitário instalado, onde é destinado aproximadamente 45% dos resíduos da RMC (LANZIANI, 2013).

LANZIANI (2013) também analisa que a incineração possui a vantagem de reduzir em até 90% os resíduos tratados, e as cinzas geradas pela queima podem ser destinadas a aterros sanitários ou incorporadas como matéria-prima na fabricação de materiais cerâmicos (desde que sejam atendidas as exigências ambientais, como por exemplo, não conter metais pesados).

Caso as cinzas sejam destinadas ao aterro, a vida útil dos mesmos seria estendida em aproximadamente 10 vezes.

Considerando o modelo de incineração e uma geração de 1.600 toneladas de RSU por dia na RMC, o estudo verificou que, a partir do tratamento desta quantidade de resíduos, seria possível ter uma potência instalada de 25 MW, com um potencial de geração de energia elétrica de 170 GWh por ano (LANZIANI, 2013).

LANZIANI (2013) adotou o valor do PCI dos RSU em 1.900 kcal/kg, valor próximo ao PCI calculado para o CEAGESP, neste trabalho (PCI de 2.117 kcal/kg, com cálculos detalhados no capítulo 6). Assim pode-se adotar os resultados da análise de viabilidade financeira de LANZIANI (2013) para análise do estudo técnico econômico no CEAGESP.

O mesmo estudo também analisa o TMB, que pode se beneficiar de outras receitas; a

fração inorgânica pode ser transformada em combustível derivado de resíduo e a fração orgânica pode ser aproveitada como fertilizantes, como já mencionado anteriormente neste trabalho.

Considerando as 1.600 toneladas de RSU, seria possível gerar 720 toneladas de CDR por dia. No aterro de Paulínia existe uma unidade que realiza a separação da fração orgânica e não orgânica, sendo possível processar até 1.000 toneladas de RSU por dia, com o principal objetivo na comercialização do CDR (LANZIANI, 2013).

A maior parte dos RSU gerados na RMC são encaminhados para aterros sanitários. Até o ano de 2012 a maior parte desses resíduos eram levados aos aterros, onde era produzido o biogás, que depois eram queimados em *flares* para a geração de créditos de carbonos. Porém existe a oportunidade para a purificação do biogás (LANZIANI, 2013), atendendo as normas de comercialização, que em geral está relacionado a retirada da umidade no biogás, na retirada do gás carbônico até que a porcentagem de metano presente seja próxima ao do gás natural e a remoção do ácido sulfídrico. Entretanto, deve-se considerar que este biometano deve atender os padrões determinados pela ANP (Agencia Nacional de Petróleo e Biocombustíveis); até 2017 a ANP proibia a injeção de biometano derivado de aterros e de ETS's nas redes de gás natural por receio da contaminação dos siloxanos presentes neste biogás. Em 2017, a partir da contribuição de vários especialistas (inclusive a equipe técnica do Projeto 27² do RCGI, Research center on Gas Innovation), a ANP passou a aceitar esta opção desde que cumpridas as inúmeras exigências³ (www.anp.gov.br).

² Projeto 27 – The biomethane's contribution prospects to increase the supply of natural gas. Research Center on Gas Innovation (FAPESP/SHELL) - <http://www.rcgi.poli.usp.br/pt-br/programas-e-projetos/programa-de-politicas-de-energia-e-economia/projeto-27/>.

³ <http://www.iee.usp.br/gbio/?q=noticia/workshop-discute-contribui%C3%A7%C3%A3o-do-biometano-para-aumentar-oferta-de-g%C3%A1s-natural-em-s%C3%A3o-paulo>

No estudo de LANZIANI (2013) considera-se que a região deve gerar aproximadamente 1.600 toneladas por dia de resíduos, sendo assim possível a implementação das três tecnologias:

- a incineração com um custo de R\$ 450 milhões,

- o tratamento mecânico biológico, também com elevado investimento (R\$ 550 milhões);

entretanto a receita não seria gerada somente pela energia, mas também pela venda de compostos orgânicos com valores agregados altos (desde que atendida a legislação ambiental adequada)

- e, por último, o biogás de aterro sanitário, com um investimento de R\$ 30 milhões para a geração de energia.

O estudo da RMC também levanta o problema do investimento inicial e dos custos de operação e manutenção da central de geração de energia a partir dos resíduos. A criação de parcerias público privadas e também os leilões para biogás são opções consideradas para o aumento da confiança de possíveis investidores (LANZIANI, 2013).

O estudo desenvolvido por LANZIANI (2013) na RMC é particularmente interessante, já que analisa o tratamento de RSU através de processos que serão aqui analisados para os resíduos da CEAGESP.

2.2 Estudo de Caso de Itanhaém

No estudo do município de Itanhaém realizado por MIRANDA (2014), foi analisada a viabilidade técnico-econômica de um sistema para aproveitamento energético de RSU através de consórcio municipal em Itanhaém.

Atualmente os resíduos da região são encaminhados para o município de Mauá, o que gera gastos em relação ao descarte e transporte.

De acordo com MIRANDA (2014), a tecnologia de gaseificação por leito fluidizado é a mais interessante para ser implementada no tratamento dos resíduos da região, considerando a reduzida quantidade de RSU gerada - geração média de 67,4 toneladas de RSU por dia.

O estudo analisa o impacto da disposição de RSU em aterros sanitários. Por se tratar de um município litorâneo, há dificuldade de serem encontradas áreas próximas para licenciamento de aterros. Por sua vez, para utilização do processo de gaseificação, é necessária a conversão dos RSU em CDR. Na configuração proposta no estudo, o gás (gás de síntese ou syngas) produzido no processo é alimentado em motogerador para geração de energia elétrica. MIRANDA (2014) prevê a geração de 1.2 GWh/mês de energia elétrica para a tecnologia de gaseificador por leito fluidizado/motor elétrico.

Este estudo de Itanhaém é uma interessante fonte de informação para o presente estudo da CEAGESP, já que a geração de RSU na região é também reduzida, como ocorre com os resíduos da CEAGESP (o entreposto gerou em 2015 a média de 140 toneladas de resíduos por dia).

2.3 Estudo de Caso da Cooperativa Intermunicipal

No estudo de cooperativas intermunicipais de NETO (2013), é analisado o caso de três metrópoles: Curitiba/PR, Belo Horizonte/BH e Salvador/BA. Os municípios são avaliados através de indicadores de identidade regional e de assimetria de forças políticas, permitindo assim ser mensurado o potencial de cooperativas municipais que incentivem o tratamento dos resíduos gerados.

No estudo foram considerados os fatores políticos, econômicos e sociais dos municípios. No caso de Belo Horizonte, o aspecto social foi o mais relevante para o estudo, devido à maior influência da cooperativa de catadores de lixo da região. Esse caso é particularmente interessante para o presente estudo da CEAGESP, já que existem muitos trabalhadores que também utilizam como fonte de renda o recolhimento e seleção desses resíduos nos entrepostos de São Paulo, principalmente na CEAGESP.

Como conclusão desse estudo, se revelou uma tendência inversa entre a identidade regional dos municípios analisados e o poder decisório em relação as cooperativas intermunicipais. Os resultados citados foram coletados através de questionários respondidos por servidores do setor público: quanto maior for a identidade regional dos municípios envolvidos na cooperativa, menor é a probabilidade de que haja uma concentração de decisão política sobre a gestão de resíduos gerados.

Esse estudo de caso é particularmente importante para a análise da CEAGESP visto que a quantidade de RSU do entreposto não é elevada (140 ton/dia).

2.4 Estudo de Caso do Consórcio CIVAP – Consórcio do Vale do Paranapanema

No estudo do caso do CIVAP, realizado por INFIESTA (2015), foi analisada a implementação de uma planta de gaseificação utilizando os resíduos gerados num consórcio de municípios no Vale do Paranapanema, onde se projeta uma potência instalada de 8,2 MW.

De acordo com INFIESTA (2015), é possível se implementar diversas soluções para o tratamento dos RSU, não existindo uma única alternativa para tratamento dos resíduos, mas sim um conjunto de tecnologias disponíveis que podem se complementar na geração de energia. Inicialmente é analisado um empreendimento teórico com o aproveitamento energético de 2.000 t/d de RSU e, em seguida, é analisado o caso do CIVAP, consórcio intermunicipal do vale do Paranapanema, realizando o tratamento de 450 toneladas de RSU por dia. A URE tem a localização prevista para o município de Palmital, local estratégico próximo da rodovia Raposo Tavares e com distância menor que 60 quilômetros entre os 26 municípios que participam do consórcio.

A análise financeira do empreendimento de maior porte (2.000 t/d de RSU) considerou três opções de destinação dos RSU: incineração, gaseificação ou geração de biogás através de aterros sanitários. A quantidade de RSU disponível a partir do consórcio de municípios foi de 2.000 toneladas por dia, com uma composição gravimétrica de 51,4% de material orgânico e 44,1% de outros materiais, como plásticos, papelão e outros materiais inertes. Com a gravimetria considerada foi calculado o PCI no valor de 1.980 kcal/kg.

A Tabela 2.1 apresenta os valores do tratamento dos RSU pela incineração no estudo de INFIESTA (2015). O valor de geração elétrica utilizado na incineração no estudo é de 0.5 MWh por tonelada de RSU, o que coincide com valor usado no estudo realizado no capítulo 5, onde é calculado o potencial energético para incineração dos resíduos da CEAGESP.

Tabela 2.1 – Aproveitamento energético de RSU com o processo de incineração (2.000 t/dia de RSU)

ITEM	UNIDADE	VALOR
Volume Diário Processado	t/dia	2.000
Dias de Operação	dias/ano	365
Poder Calorífico Inferior	kcal/kg	1.980
Geração de Eletricidade	MWh/t	0.5
Investimento Total	U\$ milhões	420
Custo O&M	R\$/t	100
Valor Cobrado para 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: Adaptado de INFIESTA (2015).

No estudo também são analisados o aterro sanitário e a gaseificação; porém, como após a entrada em vigor da PNRS ficará indisponível disposição de RSU in natura em aterros sanitários, foi desconsiderado o estudo do aterro sanitário, sendo consideradas somente a gaseificação e incineração. É importante observar que, neste caso, em virtude da elevada quantidade de RSU, ambas as tecnologias podem ser utilizadas, por serem disponíveis comercialmente; a seleção será basicamente em função do resultado da análise econômico-financeira.

Nos dados apresentados na Tabela 2.2, estão relacionados os valores estimados para a tecnologia de gaseificação de RSU em leito fluidizado. Segundo INFIESTA (2015), a geração de gás de síntese foi de 844.913.793 m³/ano e a geração elétrica de 0.348 por kWh/m³ de gás de síntese, chegando-se ao fator de conversão de energia elétrica por tonelada de RSU, valor calculado de 0,402 kWh por tonelada de RSU. A usina seria composta por 4 módulos

independentes de tratamento, sendo que teria cada uma capacidade de processamento de 500 t/dia.

Tabela 2.2 – Dados do Tratamento pela Gaseificação com 2000 t/dia

ITEM	UNIDADE	VALOR
Volume Diário Processado	t/dia	2.000
Dias de Operação	dias/ano	365
Poder Calorífico Inferior – Gás de Síntese	kcal/kg	1.160
Geração de Gás de Síntese	Nm ³ /ano	844.913.793
Geração de Eletricidade	kWh/Nm ³	0.348
Investimento – CAPEX	R\$ milhões	354.24
Operação e Manutenção	R\$ milhões/ano	20.5
Valor Cobrado na Receptação 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: Adaptado de INFIESTA (2015).

De acordo com a Tabela 2.3, a partir dos resultados do estudo, a tecnologia com a análise mais vantajosa seria a da gaseificação, com um Valor Presente Líquido Descontado (VPL) de R\$141.182.717, considerando um período de operação de 20 anos e uma taxa descontada de 12%.

Tabela 2.3 – Dados de VPL com 2000 t /dia

Tecnologia	Valor Presente Líquido (VPL)	Taxa Interna de Retorno (TIR)
Incineração	- R\$ 551.376.379	- 8,10%
Aterro Sanitário	R\$ 61.981.531	78,29%
Gaseificação	R\$ 141.182.717	30,40%

Fonte: Adaptado de INFIESTA (2015).

Por ter um investimento muito alto e um custo de manutenção maior que o da gaseificação, a incineração se demonstrou inviável com um VPL negativo. O biogás de aterro sanitário também se demonstrou viável, entretanto o seu VLP descontado foi aproximadamente 56% menor em comparação com o da gaseificação.

Depois de analisado os três métodos de tratamento de RSU: aterro sanitário, incineração e gaseificação, para uma geração diária de 2.000 t/dia, foi verificado o projeto CIVAP, consórcio intermunicipal do vale do Paranapanema, realizando o tratamento de 450 toneladas de RSU por dia.

Tabela 2.4 – Análise técnico-econômica do aproveitamento energético dos RSU do Projeto CIVAP por Gaseificação

ITEM	UNIDADE	VALOR
Volume Diário Processado	t/ano	162000
Investimento em CDR	R\$ milhões	25
Custo de Operação (CDR)	R\$/ano	5.539.258,29
Custo pela Receptação do RSU	R\$/t	80,00
Receita de Metais e RSU	R\$/ano	13.645.922,73
Investimento para Gaseificação	R\$ milhões	50.5
OPEX (Gaseificação)	R\$/MWh	2.812.218,77
Preço de Venda da Eletricidade	R\$/MWh	215
Produção Anual de Eletricidade	MWh/ano	57.992
VPL	R\$	30.437.529,09
TIR	%	41.87

Fonte: Adaptado de INFIESTA (2015).

Com um VPL de R\$30.437.529 e um payback obtido após o quarto ano de operação, pode-se concluir que o projeto é viável tanto técnico como financeiramente (INFIESTA, 2015).

2.5 Estudo de Caso dos Pequenos e Médios Municípios de São Paulo

No estudo de CALVE (2016), foi analisado o potencial de energia considerando a geração dos resíduos do estado de São Paulo.

De acordo com a ABRELPE (2015), foram geradas 62.156 toneladas de resíduos por dia em São Paulo. Em CALVE (2016), foi considerado que nos resíduos do estado de São Paulo ocorra uma triagem e reciclagem prévia antes do tratamento, sendo adotado um total de 54.866 t/dia, e reaproveitado 7.280 t/dia de resíduos. Caso todo esse resíduo de 54.866 t/dia fosse utilizado no tratamento pela gaseificação, seria possível gerar aproximadamente 1.000 GWh por mês de energia elétrica, potencial suficiente para abastecer em média 6.000 residências.

O desafio para a coleta dos resíduos no estado de SP é muito grande e a concentração de geração em uma única usina é pouco provável; assim sendo, foi realizado o estudo do tratamento de RSU em dois estudos de caso: URE Onda Verde, que é o modelo de consórcio intermunicipal de 15 pequenos e médios municípios e o URE Itapuí, um consórcio entre apenas dois municípios, com uma geração bem reduzida de RSU.

Foram estudadas também as barreiras para a aplicação da compostagem nos RSU no estado de São Paulo. Para realizar o tratamento dos RSU seria necessário que a coleta seletiva fosse eficaz na separação dos resíduos gerados, e de forma preferencial na fonte de geração, o que facilitaria a segregação da parte úmida da parte seca dos resíduos urbanos.

A URE Onda Verde teria uma geração de aproximadamente 528 t/dia de RSU, sendo que a URE localizada na cidade de Onda Verde, devido à localização estratégica para coleta dos RSU gerados nos municípios envolvidos. A URE Itapuí teria uma geração mais modesta de apenas 16,5 t de RSU por dia (CALVE, 2016).

3 Tecnologias comercialmente disponíveis para aproveitamento energético de resíduos sólidos

3.1 Incineração

O método de incineração corresponde à queima do RSU “*in natura*”, com a utilização da energia dos gases para geração de vapor em alta pressão e temperatura, a serem alimentados em turbinas a vapor acopladas a geradores, produzindo energia elétrica.

A incineração é uma tecnologia também conhecida como *waste to energy*, onde se utilizam em sua maioria resíduos urbanos, industriais e comerciais. Trata-se de uma tecnologia muito utilizada nos países industrializados, principalmente na Europa e Ásia.

De acordo com LANZIANI (2014), a tecnologia de incineração é aplicada desde os anos 70, com o desenvolvimento de novos métodos e tecnologias, em particular no que se refere à limpeza dos gases com a eliminação dos poluentes (dioxinas e furanos). Sua implementação já é madura, o que já permitiu a construção de mais de 1400 plantas de incineração ao redor do mundo.

De acordo com a EPE (EPEa, 2014), as usinas de incineração com a proposta de geração de energia elétrica operam de maneira semelhante às termoeletricas convencionais, sendo sempre utilizadas como energia de base, porém com características específicas de operação devido ao combustível que é utilizado.

Existem diversos benefícios do uso da incineração, sendo um deles referente ao tamanho mais reduzido quando comparado com as termoeletricas convencionais, o que permite sua instalação dentro de centros urbanos e locais com pouco espaço disponível. O resíduo utilizado para queima não requer pré-tratamento, reduzindo não somente o tamanho da usina pela redução de processos, como o espaço necessário para a armazenagem de RSU.

De acordo com INFUESTA (2015), existem diversas configurações de sistemas de incineração, como a combustão por grelha, por leito fluidizado, com câmeras múltiplas ou com forno rotativo, modelos que serão detalhados a seguir. Na combustão por grelha é possível se utilizarem RSU de diversas granulometrias, onde o deslocamento dos resíduos e a alta velocidade da grelha auxiliam na mistura dos gases para a geração do vapor saturado.

Em leitos fluidizados utiliza-se também lodo de esgoto, onde a granulometria precisa ser uniforme (com aproximadamente 2,5 centímetros, para serem incinerados em suspensão em um leito de partículas inertes) (INFUESTA, 2015).

De acordo com DO NASCIMENTO (2012), existem dois tipos mais utilizados de incineradores de leito fluidizado: (i) os modelos borbulhantes, em que a velocidade do ar é mantida próxima da capacidade máxima, acima da velocidade do material do leito; e (ii) os de leito circulante, em que a velocidade do ar é elevada apenas o suficiente para arrastar o material do leito de forma parcial. O modelo de incinerador de leito circulante admite mais combustível a ser queimado, devido ao calor ser levado para fora do leito pelo material inerte. Quando avaliada a eficiência dos modelos de leito fluidizado e de combustão por grelha, o modelo de leito fluidizado é mais vantajoso já que opera em torno de 30% a 40% de excesso de ar.

As câmeras múltiplas possuem capacidade menores de processamento e são indicadas para o tratamento de resíduos hospitalares, não sendo recomendado, a geração de energia elétrica, devido à baixa pressão dos gases (DO NASCIMENTO, 2012).

O forno rotativo é utilizado em resíduos industriais em locais com geração superior a 24 toneladas por dia (INFUESTA, 2015).

O modelo de forno rotativo é comumente utilizado também para resíduos perigosos, onde os resíduos giram em torno de uma fornalha cilíndrica, de modo a otimizar a

homogeneização da combustão dos resíduos. Geralmente os gases formados atingem próximo de 1.000°C na câmara de combustão, podendo atingir até 1.200°C na câmara pós combustão (Do Nascimento, 2012).

A composição dos gases gerados na combustão é variável, contendo vapor de água, gás carbônico (CO_2), óxidos de enxofre (SO_x), gás clorídrico (HCl), gás fluorídrico (HF), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e materiais particulados (De Castro, 2016). As dioxinas e furanos gerados, que são poluentes cancerígenos, precisam ser removidos até atenderem as normas vigentes. A resolução SMA n°79 de 2009 estabelece os valores que controlam a emissão dos gases.

O tratamento dos gases é uma parte crítica dos projetos; com o grau de automação industrial e sistemas de monitoramento atuais é possível realizar intervenções instantâneas e automáticas para que os parâmetros estabelecidos sejam atendidos. O controle de dioxinas e furanos é realizado através da temperatura e do tempo em que é mantida essa temperatura dos gases, sendo necessário de pelo menos 2 segundos em 800°C para a quebra das moléculas (LANZIANI, 2014).

Uma usina de incineração de RSU possui um investimento inicial muito alto, devido à necessidade destes sistemas de limpeza para que os gases de exaustão cumpram com as normas ambientais mencionados que limitam as emissões de dioxinas e furanos, entre outros poluentes.

O rendimento de uma URE baseada em incineração, utilizando as tecnologias mais modernas atualmente, pode ser de 22% de rendimento energético, isto é, 0.5 MWh por tonelada de RSU, pelo fato de se tratar basicamente de um ciclo a vapor, com as devidas limitações termodinâmicas do mesmo. Caso seja utilizado um ciclo combinado de incineração com gás natural, pode-se obter até 33% de rendimento energético, que seria aproximadamente

0.75 MWh por tonelada de RSU (INFIESTA, 2015).

O poder calorífico inferior (PCI) do RSU “*in natura*” é variável, dependendo da localidade, gravimetria e umidade dos RSU. Na Europa, por exemplo, o RSU “*in natura*” possui PCI de 2.400 kcal/kg; nos EUA, o PCI “*in natura*” é de 2.600 kcal/kg e no Brasil o PCI “*in natura*” chega próximo das 2.000 kcal/kg. (INFIESTA, 2016). O valor do PCI do RSU é de suma importância, pois o seu valor influencia diretamente a quantidade de energia elétrica gerada.

No estado de São Paulo, os limites de poluentes para os gases gerados no processo de incineração estão estabelecidos na resolução mencionada acima, a SMA nº79, de 04 de novembro de 2009. Segundo a resolução, nenhuma das medições médias diárias de emissão pode ultrapassar o valor médio diário estabelecido (Tabela 3.1). Nenhuma medição com intervalo de 30 minutos pode ultrapassar a coluna de 100% do tempo da tabela 3.1 de limite de emissão, as medições realizadas a cada 30 minutos também não podem superar o valor médio da coluna de 97% do tempo e nenhum valor dos compostos não orgânicos, da emissão de furanos e dioxinas devem ser superados, a Tabela 3.1 lista os limites de emissão dos gases e das substâncias orgânicas.

Tabela 3.1 – Limite de Emissão para Atmosfera, Substâncias Orgânicas, de Furanos e Dioxinas

	Limite de Emissão (mg/Nm³)		
	Valor Médio Diário	Valor médio de 30min	
		97% do tempo	100% do tempo
Material Particulado (MP)	10	10	30
Óxido de Enxofre (SO ₂)	50	50	200
Óxido de Nitrogênio (NO ₂)	200	200	400
Ácido Clorídrico (HCl)	10	10	600
Ácido Fluorídrico (HF)	1	2	4
Hidrocarbonetos Totais (Metano e não metano)	10	10	20
Cd + TI e seus compostos	-	-	0.05
Hg e seus compostos	-	-	0.05
Pb + As + Co + Ni +Cr + Mn + Sb + Cu + V	-	-	0.5
Dioxinas e Furanos	-	-	0.1

Fonte: Resolução SMA nº79, de 04 de novembro 2009

Como base de comparação ao limite estabelecido pela Secretária do Meio Ambiente (SMA), pode-se analisar os esforços que estão sendo realizados nos países de primeiro mundo como Estados Unidos e União Europeia.

Analisando os dados fornecido pelo relatório da Agência Internacional de Energia (IEA, 2016), conclui-se que as novas usinas de incineração possuem uma restrição maior do que as unidades em operação atualmente. Por sua vez, o valor estabelecido pela SMA nº79 é o mais restritivo em relação aos óxidos de enxofre e material particulado (MP) (uma relação de aproximadamente 33% em relação ao óxido de enxofre e de aproximadamente 50% em relação ao material particulado). Em relação ao óxido de nitrogênio, o EUA é o modelo mais restritivo, com um limite de 117 mg/m³, como ilustrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Limite de Emissão para Atmosfera em outros países

Região	SO ₂ (mg/Nm ³)		NO _x (mg/Nm ³)		MP (mg/Nm ³)	
	Atual	Nova	Atual	Nova	Atual	Nova
União Europeia	200-400	150-400	200-450	150-400	20-30	10-20
Estados Unidos	160-640	160	117-640	117	23	23

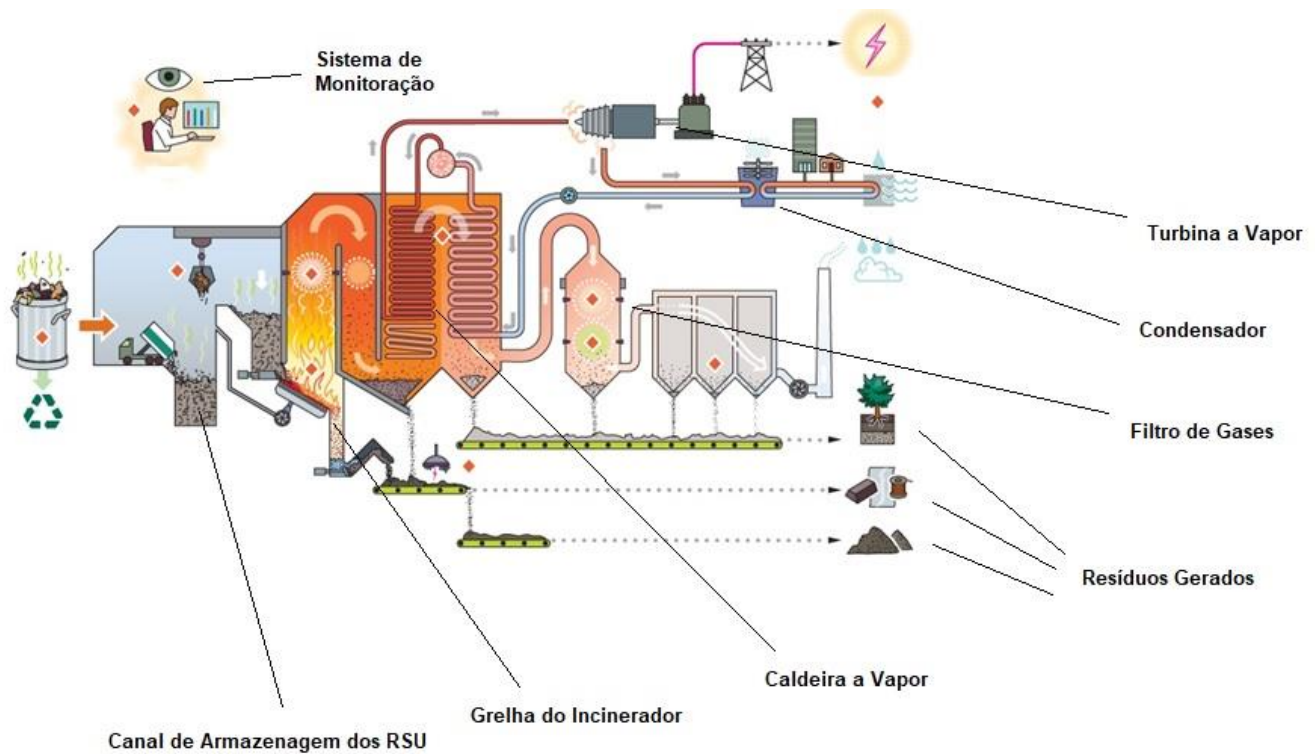
Fonte: Adaptado de IEA (2016) - www.iea.org.

A figura 3.1 ilustra um modelo de uma usina de incineração por grelha. O lixo depois de coletado é depositado em um canal de armazenagem, sendo em seguida transportado por uma garra e encaminhado para a grelha do incinerador, onde é realizada a queima a aproximadamente 800°C, com a geração de vapores em alta temperatura; uma caldeira gera vapor que é encaminhado a turbina a vapor para a geração de energia elétrica. Depois da troca de calor, os gases são lavados e neutralizados, com a injeção de cal ou hidróxido de sódio (INFIESTA, 2015). No final eles passam por um sistema de filtros do tipo manga que retém o material particulado como a fuligem, sais e hidróxidos de cálcio. Os gases da combustão em

seguida passam por um sistema à base de carvão ativado que realiza a retenção de metais voláteis, organoclorados e óxidos nitrosos.

No final do processo as cinzas são encaminhadas para aterros sanitários e os metais coletados vão para a reciclagem.

Figura 3.1 - Esquema de Usina de Incineração



Fonte: Site da Delta Way Energy - www.deltawayenergy.com

De acordo com LANZIANI (2014), a maior barreira para o desenvolvimento de novos projetos, com o método de incineração, não está relacionada à disponibilidade de equipamentos ou de filtros, mas sim ao custo de operação e de manutenção dessas plantas, quando comparadas ao modelo de aterro sanitário.

Estes custos elevados, bem como o alto investimento, fazem com que sejam viáveis comercialmente apenas as instalações de grande porte. Por este motivo só se encontram disponíveis comercialmente unidades para tratamento acima de 500-600 t/d de RSU.

3.2 Gaseificação

A gaseificação é um processo de combustão incompleta de carvão ou biomassa (ou, no caso de RSU, do CDR produzido a partir deles), com quantidades de ar/oxigênio inferiores às quantidades estequiométricas, onde ocorre a formação de um gás de baixo poder calorífico (composto basicamente de CO, H₂, CH₄ e CO₂), chamado de gás de síntese, que pode ser utilizado em motores de combustão interna para geração de energia elétrica, ou em caldeiras, gerando vapor e alimentando uma turbina a vapor para a geração de eletricidade.

De acordo com INFUESTA (2015), o sistema de aproveitamento energético de gaseificação de RSU/CDR se divide em três etapas distintas; a primeira unidade realiza a recepção dos resíduos e produz os chamados CDR. Para que seja produzido o CDR, é necessária a seleção mecânica, trituração e desumidificação, para que assim seja gerado um combustível homogêneo. A segunda unidade é a de gaseificação, que realiza a combustão incompleta do CDR e gera o gás de síntese. A terceira unidade é a unidade de geração de energia elétrica, onde há duas opções de geração: através de um motor de combustão interna (MCI - Ciclo Otto) acoplado a um gerador ou em um sistema de caldeiras e turbinas a vapor seguindo o ciclo Rankine.

O CDR é utilizado frequentemente na Europa, para a realização do tratamento térmico dos RSU. Pode-se listar algumas vantagens relacionados ao uso do CDR, como: redução da emissão de GEE, redução de gases ácidos, redução na utilização de recursos naturais não renováveis, redução de lixiviados e redução na contaminação dos solos (INFUESTA, 2015).

De acordo com INFUESTA (2015), na secagem do CDR ocorre a redução da umidade do combustível, porém pode ser um processo a ser ignorado caso o combustível utilizado já possua uma umidade abaixo dos 15% em relação ao seu peso total.

A produção de CDR pode ser realizada de duas formas: através do tratamento mecânico biológico (TMB) e pela bio-estabilização. A diferença entre os dois processos está relacionada a separação da fração orgânica como comentado no capítulo dois. O TMB realiza a separação dos resíduos orgânicos dos não orgânicos através da separação mecânica. Entretanto a coleta seletiva em complemento pela seleção mecânica é a forma mais eficaz para a separação. Na bio-estabilização, não é realizada a separação da fração orgânica, entretanto é realizada a estabilização do material que será tratado, removendo a umidade presente no resíduo (LOUREIRO apud INFUESTA, 2015).

No estudo de INFUESTA (2015), depois da secagem dos resíduos, da separação dos itens recicláveis e especiais, como metais e resíduos eletrônicos e da redução da granulometria, é necessário realizar o enfardamento hermeticamente selado, para que não haja vazamento de gases ou penetração de umidade dentro do CDR, para que não ocorra o crescimento de patógenos dentro do fardo.

Para a etapa de gaseificação propriamente dita, há dois tipos principais de gaseificadores:

- Gaseificadores de leito fixo que são modelos mais simples e geralmente com menor capacidade de geração, e
- Gaseificadores de leito fluidizado, que recebem essa nomenclatura devido à presença de um fluido, no caso um banco de areia que auxilia na homogeneização da temperatura dos gases gerados. Estes são os tipos utilizados para a gaseificação do CDR.

Também há outras classificações:

O processo pode ser de fluxo contínuo ou batelada, sendo a técnica mais comum à oxidação parcial utilizando um agente de gaseificação (oxigênio, ar ou vapor quente), em quantidades inferiores a estequiométrica (mínimo teórico de oxigênio para combustão), para a produção de gás de síntese cujos principais componentes são monóxido de carbono e hidrogênio, mas contêm também dióxido de carbono e, dependendo das condições, metano, hidrocarbonetos leves, nitrogênio e vapor de água em diferentes proporções (CARBOGAS e FEAM, 2012 apud CALVE, 2016, p.20).

A gaseificação em empreendimentos com uma potência instalada maior do que 2 MW possui um ganho de escala em termos econômicos, considerando os custos de instalação e manutenção (INFIESTA, 2015).

A gaseificação ainda apresenta uma barreira devido ao controle da pureza do gás, mesmo apresentando uma alta eficiência de conversão de 60 a 90% e tendo a possibilidade de operação em potências reduzidas. A composição gravimétrica dos resíduos altera a composição do gás de síntese, que geralmente está contaminado de alcatrão, poluente que deve ser controlado até níveis aceitáveis, o que também eleva os custos deste processo, mas em níveis inferiores ao da incineração. Como a gaseificação é uma combustão incompleta com quantidades reduzidas de ar/oxigênio, há formação de dioxinas e furanos em quantidades extremamente reduzidas, sem necessidade de maiores sistemas de limpeza sofisticados como na incineração.

A melhor eficiência no aproveitamento dos resíduos utilizando o ciclo Otto é de 35%, que é o modelo dos MCI; já nos ciclos Rankine o aproveitamento é de 30%, mas deve ser lembrado que unidades com potência acima de 2 MW, o ciclo Rankine se torna mais viável economicamente devido ao ganho de escala (CARBOGAS, 2014 apud INFIESTA, 2015).

Existem diversos benefícios no uso do tratamento de RSU através da gaseificação (e dos tratamentos térmicos em geral), como redução de espaço para aterros, diminuição da emissão de metano a partir da decomposição de matéria orgânica em aterro, redução dos riscos de contaminação das águas subterrâneas próximas ao aterro e redução do custo de transporte.

3.2.1 Leito Fixo

Os gaseificadores de leito fixo podem ser alimentados no mesmo sentido da alimentação de ar ou no sentido contrário, sendo denominada gaseificador concorrente (*updraft*) e contracorrente (*downdraft*), respectivamente. Os gaseificadores de leito fixo são modelos mais simples e mais utilizados para potências de até 200Kw, considerando as questões operacionais⁴.

De acordo com CALVE (2016), na configuração concorrente, os gases gerados sofrem o craqueamento térmico adequado do alcatrão, fato que não ocorre na configuração contracorrente.

Os gaseificadores do tipo leito fixo são os modelos mais comuns encontrados em operação, eles representam 77.5% dos projetos de gaseificadores (Henriques, 2009 apud INFIESTA, 2015).

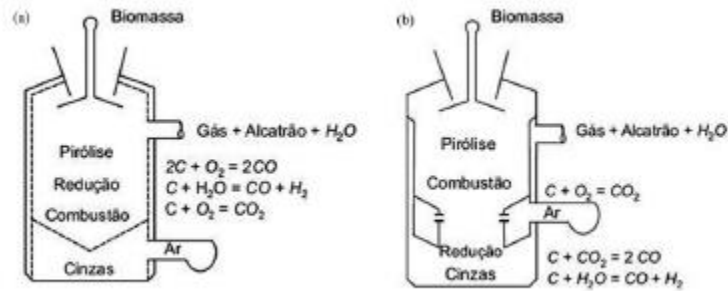
Os gaseificadores são estruturados por camadas ou zonas de reação, sendo: secagem, pirólise, redução e combustão.

Na pirólise ocorre o aumento da temperatura próximo dos 500°C, e é a fase onde ocorre a formação do alcatrão e dos outros produtos gasosos. Na redução há a formação do metano e outras reações endotérmicas. A quarta etapa é a combustão, que ocorre de forma imparcial com o ar ou as vezes somente com gás oxigênio, fornecendo o calor necessário para as outras reações acontecerem.

⁴ Coelho, S.T. (2016). Notas de aula. PECE – Programa de Educação Continuada. EPUSP. USP>

A figura 3.2 apresenta os modelos de gaseificadores concorrente e contracorrente.

Figura 3.2 - Modelos de Gaseificador Concorrente e Contracorrente



Fonte: (RAMOS, 2011)

O modelo de leito fixo não é o modelo mais adequado para o tratamento dos resíduos gerados pelo CEAGESP, isso ocorre pelas vantagens que o gaseificador de leito fluidizado oferece aos resíduos do entreposto, no próximo item será abordado com mais detalhes o modelo de leito fluidizado.

3.2.2 Leito Fluidizado

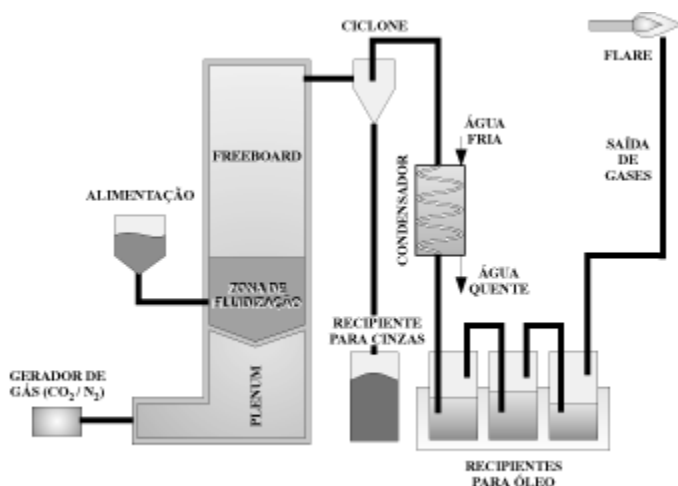
Existem 2 tipos de gaseificadores de leito fluidizado, são os que operam em pressão atmosférica e os que operam pressurizados. Na saída do gaseificador, os gases gerados são direcionados para uma série de ciclones (eficiência de 70 a 80%), onde ficam retidos os materiais sólidos arrastados pelo leito.

A gaseificação fluidizada possui a alimentação de ar e de vapor pressurizados pela parte inferior da câmara de combustão vertical. A alimentação do combustível é realizada acima, promovendo uma combustão na zona de fluidização (INFIESTA, 2016). Importante lembrar que, antes da alimentação no gaseificador de leito fluidizado, os RSU são transformados em CDR, combustível derivado de resíduos.

É válido lembrar que os únicos dois processos comercializado e que convertem de forma rápida os resíduos em energia, são o de incineração e o de gaseificação. O processo de gaseificação em leito fluidizado é interessante, por permitir o uso de biomassa com alta umidade, próximo de 60% a 70%, ao contrário do leito fixo, que requer uma umidade máxima de 20%.

Segundo INFIESTA (2015), a principal vantagem do gaseificador em leito fluidizado é a possibilidade de tratamento de uma grande diversidade de materiais. Este tipo apresenta uma maior tolerância a combustíveis com alta umidade e diferentes granulometrias, podendo ser alimentado com combustíveis sólidos, líquidos ou pastosos. Caso seja utilizado o gaseificador de leito fixo na gaseificação dos combustíveis com maior umidade e granulometria não uniforme, será intensificada a formação de compostos como alcatrão, ácidos e aldeídos tóxicos.

Figura 3.3 - Modelo de Gaseificador de Leito Fluidizado



Fonte: (GOULART, 1999)

Após a gaseificação do CDR no leito fluidizado, os produtos inertes - como as cinzas geradas - são extraídos em um recipiente, geralmente localizado no fundo do leito fluidizado. Além das cinzas, também é encontrado sulfato de cálcio, produto utilizado para neutralizar o enxofre que é gerado durante a combustão INFIESTA (2015).

A Tabela 3.3 lista o porte geralmente utilizado dos gaseificadores, o teor de umidade requerido para a biomassa e o tipo de gaseificador.

Tabela 3.3 - Comparação entre Gaseificador de Leito Fixo e Leito Fluidizado

	Gaseificador de leito fixo	Gaseificador de leito fluidizado
Porte (potência elétrica)	Pequeno Porte (<200 kW)	Grande Porte (>200 kW)
Teor de umidade da biomassa	Baixa Umidade (<20%)	Qualquer Umidade

Fonte: Autoria Própria a partir de COELHO (2016).

3.3 Digestão Anaeróbica e Aterro Sanitário

A digestão anaeróbica é o tratamento dos resíduos onde ocorre a decomposição anaeróbica da matéria orgânica (sem a presença do oxigênio) e a consequente produção do biogás. O biogás é composto de aproximadamente 60% de metano, 35% de gás carbônico e 5% de outros gases como nitrogênio, hidrogênio e monóxido de carbono, gás que pode ser utilizado na alimentação de sistemas de geração elétrica (WEREKO-BROBBY; HAGEN, 2000 apud GARCILASSO, 2016).

De acordo com a EPE (EPEa, 2014), os aterros utilizados nas principais cidades brasileiras estão em fase final de operação e a construção de novos aterros somente reconhece o adiamento de uma solução mais concreta; essa situação motiva a busca por outras soluções, que reduzam a quantidade de resíduos dispostos em aterros, que criem receitas na comercialização dos produtos gerados, até porque a nova PNRS impede a disposição do lixo “in natura” em aterros.

Existem alguns fatores que podem influenciar o processo de digestão anaeróbica, como a composição dos RSU, a umidade presente no resíduo, a temperatura, o pH e o tamanho das partículas (INFIESTA, 2015).

Existem dois processos anaeróbicos onde ocorre a geração de biogás:

- Através de biodigestores, comumente utilizados em zonas rurais e isoladas para cocção e conversão de energia, e
- Aterros sanitários, tecnologia já dominada no mercado brasileiro. Existem diversas desvantagens nos aterros sanitários, principalmente a necessidade de novas e grandes áreas. No caso dos lixões há o risco de vazamento do chorume, líquido resultante da compactação das camadas de resíduos e de atraírem roedores e animais. Em geral,

mesmo nos aterros sanitários devidamente licenciados, a população é resistente na aceitação desses terrenos próximos às zonas urbanas, fazendo com que seja necessário o transporte dos RSU por maiores distâncias, aumentando o custo de operação.

A análise de viabilidade em aterro sanitário nesse estudo, é somente como base de comparação em relação às outras fontes de energia, devido às condições que a PNRS estabelece. A PNRS prevê a destinação para aterro somente de rejeitos, assim havendo a necessidade de estudo de viabilidade das alternativas que não sejam o aterramento (EPEa, 2014).

Figura 3.4 - Ilustração de um Aterro Sanitário



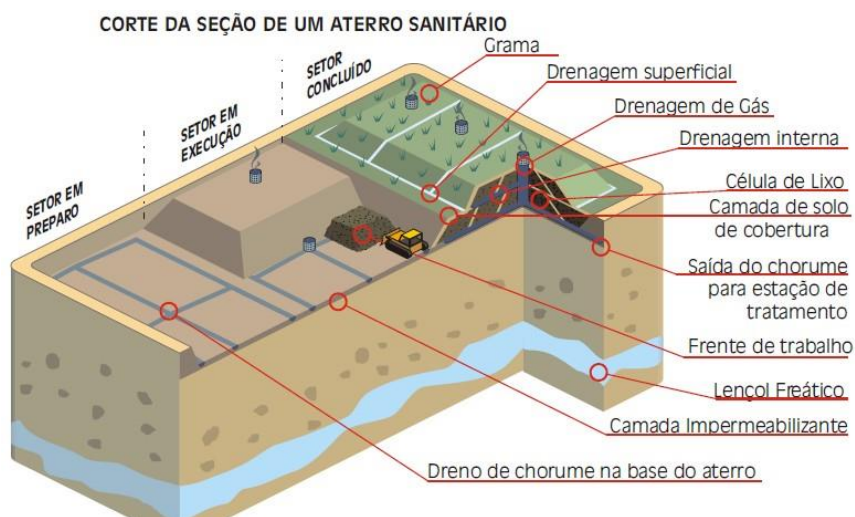
Fonte: ABRELPE, 2016 – www.abrelpe.org.br

Os métodos de acondicionamento e coleta adotados pela maioria das cidades resultam na mistura de materiais que dificilmente são separados pelos processos de triagem atualmente utilizados. Como consequência, tanto as “usinas de compostagem” quanto as técnicas de “coleta seletiva” geram rejeitos que, obrigatoriamente, devem ser descartados. Até mesmo as soluções que serão citadas posteriormente de incineração e gaseificação que geram escórias e cinzas que precisam ser descartadas em aterros (CETESB, 2014 apud CALVE, 2016, p.13).

A geração de biogás em aterros sanitários ocorre em quatro fases, a fase aeróbica é a primeira onde está presente o gás carbônico em grande quantidade e também o gás nitrogênio, quantidade que irá ser reduzida nas duas etapas seguintes; a segunda etapa está relacionada à eliminação do oxigênio, resultando em um ambiente anaeróbico com grande porcentagem de gás carbônico e um pouco de gás de hidrogênio; a terceira etapa é a fase anaeróbica onde começa a produção de gás metano e redução do conteúdo de gás carbônico; a última fase é a estabilização na produção de metano, gás carbônico e nitrogênio (EPEb, 2014).

A figura 3.5 ilustra o corte de um aterro sanitário. Conforme CALVE (2016), primeiramente é preparado o terreno, onde já é projetada a quantidade de resíduos que serão recebidos além de realizar a montagem dos drenos, que são compostos por polietileno de alta densidade ou concreto. A camada impermeabilizante é composta por mantas de policloreto de vinila (PVC) e argila, para que não haja infiltração do chorume no lençol freático, os resíduos são compactados por camadas e a recuperação do biogás é realizado através de uma ventilação forçada e podem ser encaminhadas para URE.

Figura 3.5 - Seções e Etapas do Aterro Sanitário



Uma questão obrigatória relacionada aos aterros sanitários é a produção e captação do biogás, mas é importante lembrar que uma parte do potencial energético ficará aterrado e sem possibilidade de uso, pois há diversos materiais não orgânicos e que não passam pelo processo de biodigestão. A eficiência de captação de biogás do aterro é de 60%-70% e o potencial energético vai se reduzindo com decorrer do tempo, pois a quantidade de material orgânico vai sendo reduzida (INFIESTA, 2015).

Os custos com logística dos RSU para o encaminhamento para aterros sanitários é em torno de 80 reais por tonelada de RSU (COELHO, 2016). A redução dos custos com logística não beneficia a viabilidade econômica, mas impacta o custo global de gerenciamento.

No relatório da EPE (EPEa, 2014), no caso de um biodigestor o processo é semelhante aos aterros, mas há necessidade de processos anteriores à biodigestão. A primeira etapa de tratamento dos resíduos é a unidade de triagem e pré tratamento dos resíduos, já que somente é tratado a parcela orgânica dos RSU, esses processos são necessários para a adequação dos resíduos antes de destinar ao biodigestor.

O uso mais simples do biogás está relacionado no uso do seu potencial térmico, podendo ser utilizado em processos industriais (como em operações de secagem ou produção de cimentos e asfaltos) ou em caldeiras (EPEa, 2014). O transporte pode ser realizado através de gasodutos que estejam próximos do consumidor final, mas neste caso é necessária uma filtragem do gás e a remoção de particulados, além da eliminação dos chamados siloxanos⁵ e de outras impurezas, além do CO₂, produzindo o chamado biometano, que deve seguir as normas estabelecidas recentemente pela ANP. Como já mencionado, apenas em 2017 a ANP liberou a injeção de biometano de aterros e ETE's em redes de gás natural, mas ainda com inúmeras restrições.

⁵“Os siloxanos são um subgrupo de compostos de sílica que contém ligações de Silício e Oxigênio com radicais orgânicos ligados a molécula de sílica incluindo grupos metilo e etilo, entre outros.” (ATLAS,2016)

A resolução nº 685 de 29 de junho de 2017 estabelece as especificações do biometano e das regras para a sua aprovação no controle de qualidade, sendo destinado para o uso veicular, residencial, comercial ou para indústrias (ANP,2017).

A Tabela 3.4 apresenta a resolução da ANP.

Tabela 3.4 – Tabela de Especificação do biometano oriundo de aterros e tratamento de esgoto

Características	Unidades	Limite		
		Norte	Nordeste	Centro-Oeste Sudeste Sul
Poder Calorífico Superior	kJ/m³	34.000 a 38.400	35.000 a 43.000	
	kWh/m³	9.47 a 10.67	9.72 a 11.94	
Índice de Wobbe	kJ/m³	40.500 a 45.000	46.500 a 53.500	
Metano, mín.	% mol	90.0	90.0	
Etano	% mol			
Propano	% mol			
Butano e mais pesados	% mol			
Oxigênio, máx.	% mol	0.8	0.8	
CO2, máx.	% mol	3.0	3.0	
CO2 + O2 +N2, máx.	%mol	10		
Enxofre Total, máx. (4.5)	mg/m³	70		
Gás Sulfídrico (H2S), máx.	mg/m³	10		
Ponto de orvalho de água a 1atm, máx.	°C	-39	-39	-45
Ponto de orvalho de hidrocarbonetos	°C	15	15	0
Teor de siloxanos, máx.	mgSi/m³	0.3	0.3	
Clorados, máx.	mg (Cl/m³)	5.0	5.0	
Fluorados, máx.	mg (F/m³)	5.0	5.0	

Fonte: Resolução ANP nº685 de 29 de junho 2017

É esperado que os custos do tratamento dos resíduos sólidos urbanos sejam crescentes no Brasil, principalmente pelas exigências da PNRS, que proíbe a disposição nos aterros sem os tratamentos prévios (EPEb, 2014).

Caso o aterro sanitário não possua um sistema de conversão de energia, o biogás coletado é queimado em *flares* (CALVE, 2016), isso ocorre para reduzir o impacto dos gases do efeito estufa (GEE), pois o gás carbônico produzido pela queima do biogás tem um impacto de aproximadamente 25 vezes menor que o metano produzido nos aterros (EPEa, 2014).

O biometano é o gás obtido a partir da purificação do biogás, removendo o gás carbônico e outros gases. O biometano pode ser um substituto ideal para o gás natural e os mercados que podem ser atendidos são diversos, indo desde o gás canalizado, para uso residencial, até o mercado veicular. Entretanto para o uso no mercado veicular, onde é comumente utilizado combustíveis como diesel, gasolina ou etanol, ainda há uma resistência na utilização pelas indústrias mais tradicionais. Entretanto é possível também a autoprodução de biometano, para abastecer a frota de veículos próprios adaptados para operarem com gás natural, o que também enfrenta restrições das indústrias de motores e montadoras em geral (EPEa, 2014). Em todos estes casos é necessário que as exigências da ANP sejam satisfeitas, como mencionado acima.

De acordo com os relatórios da EPE (EPEa, 2014), a produção de biometano a partir do tratamento de resíduo sólido urbano, apresenta uma competitividade maior do que a geração de energia elétrica, isso devido ao preço dos combustíveis serem superior ao dos preços da eletricidade.

3.4 Tratamento Mecânico Biológico

O tratamento mecânico biológico (TMB) é a combinação dos tratamentos mecânico e térmico dos resíduos sólidos, podendo se dividir o processo em duas etapas: a etapa mecânica onde é separado as partes de material orgânico e não orgânico (LIMA, 2014).

Nesta etapa, de acordo com PRATES, AMARAL, MENZEL e NEUFFER (2016) tem-se os objetivos também de reduzir o tamanho do material recebido e homogeneizar a sua estrutura física, realizar a reciclagem dos materiais metálicos e plásticos, além de aumentar a concentração de material orgânico. A outra etapa é o processo biológico, onde se pode tratar os resíduos para geração de biogás ou realizar a compostagem.

Segundo LIMA (2014), a separação mecânica dos resíduos é realizada através de crivos rotativos, modelos de tambores perfurados onde pode ser separado os resíduos em até três frações diferentes. A primeira fração é composta por materiais mais finos (granulometria menor que 90mm), materiais que escoam através dos furos nos crivos rotativos, a segunda fração é composta por materiais de dimensões médias (granulometria entre 90mm e 200mm) que serão coletados através do separador balístico; a terceira fração corresponde a itens maiores que necessitam da triagem manual (granulometria maior do que 200mm). O separador balístico também realiza a separação dos itens de dimensões médias em três grupos: materiais rolantes, materiais finos e materiais planos. O separador balístico é composto por placas também perfuradas e adjuntas entre si, o equipamento possui uma inclinação para realizar a separação dos materiais rolantes dos materiais planos, onde os materiais rolantes irão se concentrar no fundo das placas e os materiais planos na parte superior, e em relação aos materiais finos, eles serão coletados abaixo das placas, já que sua seleção ocorreu através das furações das placas.

Para a reciclagem de materiais reutilizáveis, são utilizados separadores magnéticos, que irão captar os materiais ferrosos, e para os não ferrosos são utilizados o separador por correntes de Foucault, esse equipamento permite separar materiais não ferromagnéticos como alumínio, cobre e bronze.

O processo de digestão anaeróbica no TMB possui os mesmos fundamentos dos que ocorrem nos aterros sanitários, mas claramente existe diferença nos resíduos, já que, na maioria dos casos, em aterros não ocorre a triagem mecânica.

Como comentado anteriormente, o TMB apresenta vantagens em relação a outros métodos de tratamento, conforme listado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Principais Vantagens e Desvantagens do TMB

Vantagens do TMB	Desvantagens do TMB
Melhor aceitação pela população Permite a recuperação dos itens recicláveis Redução de lixiviado devido a uma maior densidade do composto produzido	Como após a separação mecânica ainda há resíduos que não podem ser recicláveis e/ou comercializados, ainda há necessidade de um tratamento térmico para estes resíduos. Considerando a escala de produção este tratamento térmico pode não ser viável e, assim, não se consegue cumprir a PNRS.

Fonte: Adaptado dos dados obtidos a partir de PRATES et al (2016) e LIMA (2014).

No estudo de PRATES et al LIMA (2016), são mencionadas diversas dificuldades relacionados ao TMB; em relação ao processamento mecânico foi verificado um grande desgaste dos equipamentos, além de bloqueios constantes no sistema de triagem que acarretaram em constantes manutenções e limpezas. Na digestão anaeróbica foi verificado uma variação acima do esperado na produção de biogás, fato que ocorreu devido a alimentação inconstante de substratos orgânicos.

4 Cenário atual de RSU no Brasil e no mundo

4.1 Biomassa no Brasil e no mundo

Atualmente, existe um esforço importante de muitos países para a transição das energias fósseis para as renováveis, como se verifica em vários documentos produzidos por IEA, IRENA e REN21⁶.

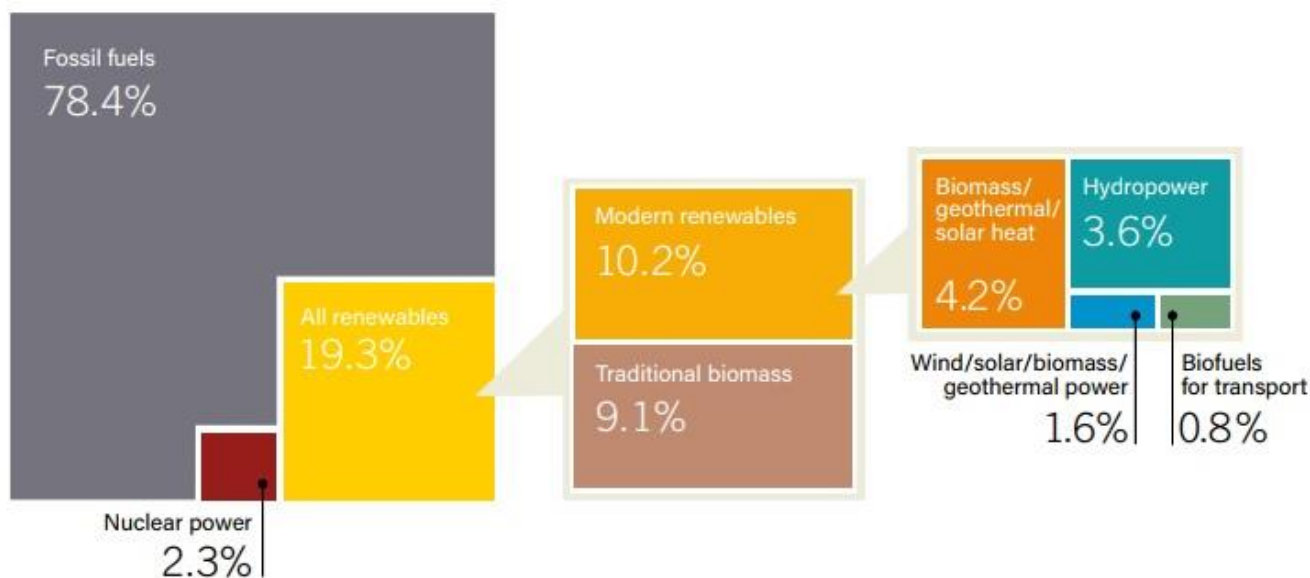
Em 2016 (REN21, 2017), houve uma redução dos investimentos alocados nessa transição em aproximadamente 23%, devido à desaceleração da economia dos países em desenvolvimento como a China, Índia e países da América do Sul. Entretanto o crescimento de potência instalada da maioria das fontes renováveis não foi afetado, caso não diferente da biomassa, que aumentou a sua potência instalada em aproximadamente 6% em 2016, devido principalmente ao crescimento desta fonte na Europa e Ásia.

O consumo energético em 2015 teve uma representação de 19.3% das energias renováveis, sendo 9.1% de biomassa tradicional, utilizada principalmente para aquecimento e cocção em sistemas altamente ineficientes e prejudiciais à saúde, além de contribuir para o desmatamento de florestas nativas em diversos países em desenvolvimento; a biomassa moderna é utilizada em diferentes processos de conversão energética, para geração de energia elétrica e térmica ou na produção de biocombustíveis.

Na figura 4.1 é representado o consumo energético de 2015, ilustrando que o uso predominante de energia ainda é de energia de origem fóssil, 78.4%.

⁶ A REN21 é uma rede global de governos, institutos acadêmicos, organizações internacionais e não governamentais, que realizam estudos que facilitem a troca de informação, auxiliem no desenvolvimento de políticas que aceleram a transição de fontes não renováveis para modelos sustentáveis com as fontes renováveis e que incentivam o debate sobre os desafios atuais. (REN21,2017)

Figura 4.1 – Participação das renováveis no consumo de energia no mundo em 2015



Fonte: REN21, 2017

Como uma breve conclusão, verifica-se que os países vêm dando mais atenção às energias renováveis. Outro resultado importante se refere ao crescimento do mercado de trabalho (geração de empregos) em relação a fonte de energia renovável. No Brasil é demonstrado esse resultado de crescimento, pois o país é o que mais emprega trabalhadores relacionados no mercado de biocombustíveis líquidos, 783 mil pessoas, boa parte devido ao setor de etanol/biodiesel.

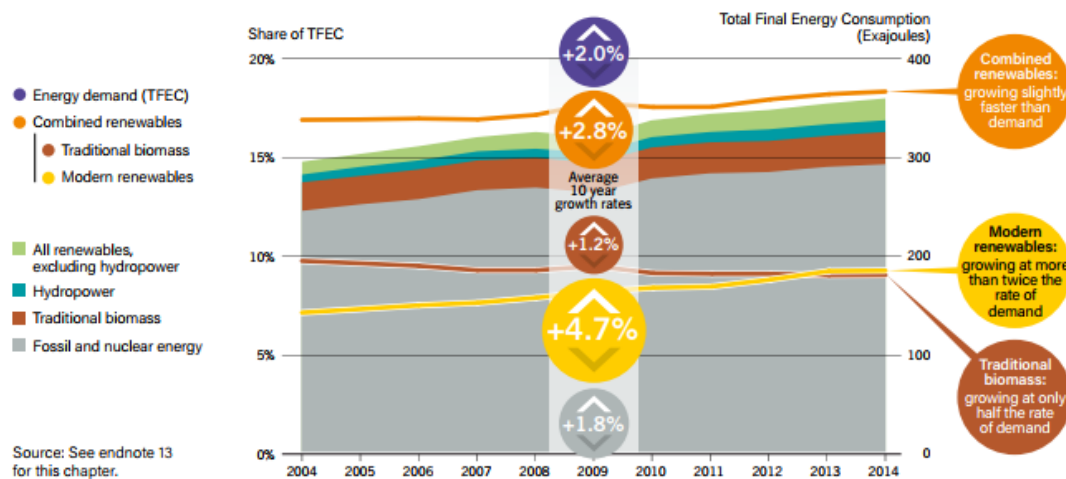
Entretanto, não há dados em relação ao mercado de biomassa sólida e nem mesmo de biogás. Como referência pode-se analisar o estado dos Estados Unidos, onde os dois mercados geram aproximadamente 90 mil empregos. Pode-se considerar que o mercado de biomassa sólida no Brasil possua além das oportunidades de geração de energia elétrica, as oportunidades de geração de empregos.

Como comparação do mercado de trabalho, de acordo com a REN21 (2017), a fonte renovável que mais emprega no mundo atualmente é a fotovoltaica e a segunda é a energia

baseada em biomassa.

A partir da figura 4.2 pode-se concluir que desde 2004, as energias renováveis modernas vêm aumentando a uma taxa duas vezes maior do que a demanda energética mundial e a biomassa tradicional (felizmente) vem no sentido contrário, reduzindo a uma taxa pela metade da demanda.











Figura 4.2 – Evolução do consumo final de energia no mundo comparado com a biomassa tradicional e as fontes renováveis modernas



Fonte: REN21, 2017

A figura 4.3 ilustra os empregos gerados por cada fonte de energia renovável segundo o REN21 (2017).

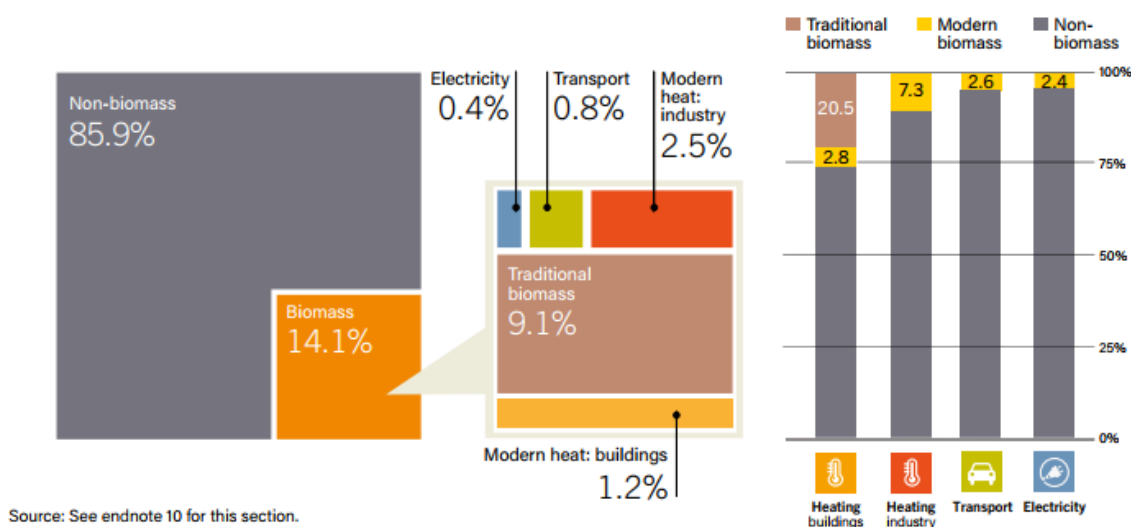
Figura 4.3 - Empregos Gerados por Fonte de Energia Renovável

	World	China	Brazil	United States	India	Japan	Bangladesh	European Union¹		
	THOUSAND JOBS									
 Solar PV	3,095	1,962	4	241.9	121	302	140	31.6	16	67
 Liquid biofuels	1,724	51	783 ^c	283.7 ^f	35	3		22.8	22	48
 Wind power	1,155	509	32.4	102.5	60.5	5	0.33	142.9	22	165
 Solar heating/cooling	828	690	43.4 ^d	13	13.8	0.7		9.9	5.5	20
 Solid biomass ^{a,g}	723	180		79.7 ^e	58			45.4	50	238
 Biogas	333	145		7	85		15	45	4.4	15
 Hydropower (small-scale) ^b	211	95	11.5	9.3 ⁱ	12		5	6.7	4	35
 Geothermal energy ^a	182			35		2		17.3	37.5	62
 CSP	23	11		5.2				0.7		3
Total	8,305 ^h	3,643	875.9	777.3	385	313	162.3	334 ⁱ	162	667 ^a
 Hydropower (large-scale) ^b	1,519	312	183	28	236	18		6	9	46
Total (including large-scale hydropower)	9,824	3,955	1,058	806	621	330	162	340	171	714

Fonte: REN21, 2017.

Como pode-se verificar na figura 4.4, 20,5% da energia utilizada para aquecimento é a partir da biomassa tradicional. Já a biomassa moderna tem vários usos mais eficientes, como eletricidade, transporte e aquecimento industrial.

Figura 4.4 - Comparação dos Usos Energéticos Finais da Biomassa



Fonte: REN21, 2017.

De acordo com BEN (2017), a matriz energética elétrica do Brasil está baseada principalmente em duas fontes de geração, as hidrelétricas e as termoelétricas. As termoelétricas podem se utilizar da biomassa ou dos combustíveis fósseis, sendo que na biomassa temos o cavaco de madeira, o bagaço da cana de açúcar, resíduos florestais, os RSU, óleos de origem vegetal, carvão vegetal e o biogás de aterros sanitários, biodigestores e tratamento de esgoto. Já em relação aos combustíveis fósseis, temos o gás natural, o gás liquefeito de petróleo (GLP), óleos combustíveis, carvão mineral, gás de xisto, gás de turfa e outros gases do setor siderúrgico.

De acordo com PPE (2012), o Brasil possui como meta até 2024 a instalação de 18 GW em energia elétrica baseada em biomassa. Neste contexto, o aproveitamento energético dos de RSU e, em particular dos resíduos de entrepostos de abastecimento como o caso da CEAGESP - tema da presente monografia - pode contribuir para aumentar a potência instalada dessa fonte de energia.

No próximo item será abordada a PNRS, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, além de algumas diretivas normativas.

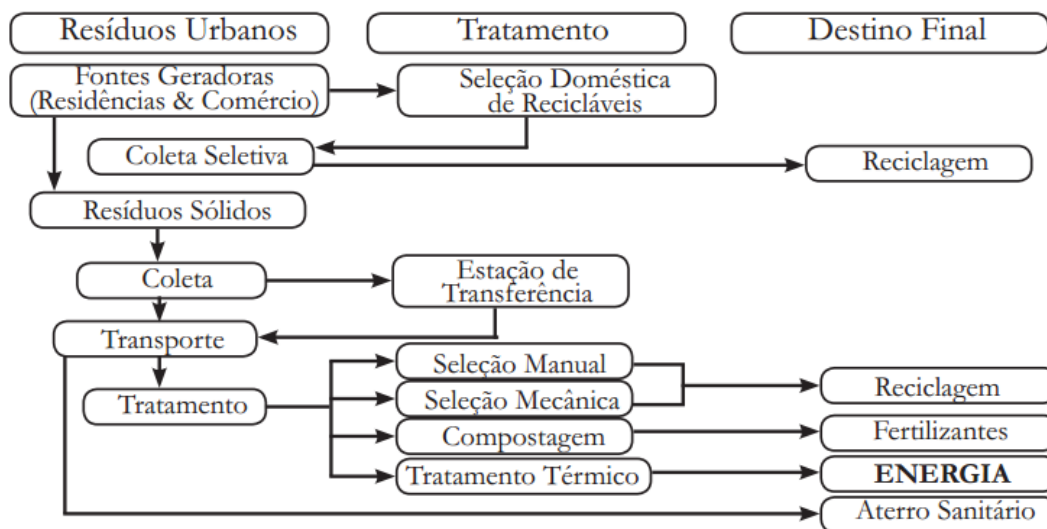
4.2 Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e o caso do Estado de São Paulo

A Lei n. 12.305⁷, aprovada em 2010, também conhecida como Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelece diretrizes relacionadas à gestão de resíduos sólidos e às responsabilidades dos geradores. Existem diversos instrumentos que podem ser utilizados para que se tenha maior responsabilidade em relação aos resíduos, como a utilização de logística reversa, que se caracteriza por um ciclo de vida de um produto fechado, de modo que o resíduo seja retornado para o seu fabricante e reciclado, ou a reciclagem seletiva que é ação de separar os materiais orgânicos, metais, plásticos, papéis e não orgânicos (aproveitando os itens recicláveis).

A PNRS define como destinação adequada os resíduos que tenham sido reciclados, compostos ou que tenha sido destinado ao aproveitamento energético. E, caso contrário, que seja disposto de forma adequada em aterros sanitários sem apresentar risco à saúde e à segurança pública.

⁷ http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm

Figura 4.5 - Fluxograma da PNRS



Fonte: Plano Paulista de Energia 2020 – www.energia.sp.gov.br

Como pode ser visto na figura 4.5, após a geração de um resíduo é necessário obrigatoriamente o tratamento para que seja então realizada a destinação final. A geração de resíduos ocorre em qualquer setor (domiciliar, comercial, construção civil, industrial, saúde e as diversas outras atividades). Isso demonstra como a destinação e o tratamento dos resíduos são questões a serem discutidas e compartilhadas; a responsabilidade compartilhada, dos fabricantes, consumidores e distribuidores é uma questão fundamental, pois todos possuem a responsabilidade da utilização consciente e da correta destinação.

A PNRS estabelece uma ordem na gestão de resíduos:

1. Não Geração
2. Redução
3. Reutilização
4. Reciclagem
5. Tratamento dos Resíduos Sólidos
6. Disposição Final Adequada

Para a correta destinação dos resíduos gerados, é necessário verificar quais resíduos apresentam riscos para sociedade, são utilizadas três classes de resíduos, os de classe tipo I, tipo II e os derivados da atividade da construção civil.

Os resíduos do tipo I são os itens considerados perigosos, por se tratarem de derivados corrosivos, cancerígenos, tóxicos, inflamáveis ou outros com alta periculosidade. Por essas características físico-químicas não é possível a destinação em conjunto com os outros resíduos, alguns exemplos desses resíduos são: óleos, descartes da prática hospitalar, ácidos e solventes utilizados no setor químico.

Os resíduos do tipo II são os produtos inertes e não inertes, esses resíduos podem apresentar riscos à saúde pública e ao meio ambiente, porém não se enquadram como resíduos de maior nível de perigo como os resíduos de classe I, os resíduos inertes são os que possuem características inertes em relação a reação com solventes e água destilada, em geral não apresentam risco suficiente a saúde pública.

No caso do estudo aqui em desenvolvimento, verifica-se que os resíduos gerados na CEAGESP em sua totalidade podem ser enquadrados como classe II pois são alimentos, plásticos e papelão.

No caso do estado de São Paulo, de acordo com a PPE (2012), a implantação de unidades de aproveitamento energético – URE - (principalmente incineração) vem sendo consideradas como opções interessantes pelo Governo Estadual. O relatório da Matriz Energética do Estado de São Paulo 2035 previa que, no ano de 2015 o estado teria uma potência instalada de 18 MW relacionados ao tratamento de RSU, sendo projetado para o ano de 2020 uma potência instalada de 94 MW com um investimento acumulado de aproximadamente 1 bilhão de reais. Entretanto, em 2017, ainda há apenas uma planta em construção, em Barueri, com uma potência prevista de 20 MW, com o processamento de 825

toneladas de RSU por dia.

Na verdade, não tem ocorrido o investimento necessário para a construção das URE baseadas em RSU para se atingir a potência instalada projetada. Além da planta de Barueri há as discussões em curso na Agencia Metropolitana da Baixada Santista, buscando a melhor solução para os RSU da região que atualmente são transportados até os aterros situados no alto do planalto (MIRANDA, 2014). A Tabela 4.1 lista os principais parâmetros de operação de empreendimentos energéticos com base em RSU.

Tabela 4.1 - Principais parâmetros de um estudo de caso para incineração de RSU em São Paulo

Principais parâmetros técnicos de empreendimentos com RSU		
	Geração de Energia Elétrica (2015)	Geração de Energia Elétrica (2020)
Potência Instalada (MW)	18	94
Consumo Interno (MW)	1.8	9.4
Disponibilidade Operativa (%)	90	90
Energia (MW médio)	14	74
Cinzas – classe I (t/dia)	36	188
Escórias – classe II (t/dia)	108	564
Consumo de RSU (t/dia)	810	4.260
Investimentos (milhões de R\$)	195	1.027

Fonte: Plano Paulista de Energia 2020 – www.energia.sp.gov.br

Na verdade, observa-se duas grandes dificuldades para o desenvolvimento de processos de aproveitamento energético de RSU: a falta da viabilidade econômico financeira, e o comportamento conservador dos atores envolvidos⁸. No caso da viabilidade econômico financeira, verifica-se a falta de políticas de incentivos para um número maior de unidades de demonstração; a única unidade em construção é a de Barueri acima mencionada, ainda enfrentando dificuldades para conseguir apoio de empreendedores.

Observa-se o comportamento conservador em vários atores: por parte do setor elétrico, onde há a possibilidade de projetos conjuntos entre as concessionárias de energia elétrica e

⁸ Coelho, S. 2016. Notas de aula. PECE – Programa de Educação Continuada, EPUSP, USP.

os municípios, a sinergia entre a energia e o saneamento básico ainda não é reconhecida. Por parte da sociedade civil, os processos de aproveitamento energético ainda não são aceitos, por falta de adequado conhecimento dos mesmos.

O receio das emissões poluentes (principalmente dioxinas e furanos) é elevado, não havendo a disseminação do conhecimento de dois aspectos importantes:

- há legislação extremamente restritiva e segura para o controle de emissões no estado de São Paulo, como mencionado acima;

- no processo de gaseificação de RSU não há formação de dioxinas e furanos, pois a reação ocorre com participação reduzida de oxigênio, o que impede a sua formação.

Outro receio significativo – também por falta de conhecimento – é de que estes processos eliminem o trabalho dos chamados catadores, o que corresponde a significativa fonte de renda nas camadas mais pobres da população. Esta falta de conhecimento impede que se saiba que os processos de aproveitamento energético se utilizam, de fato, de coleta seletiva – ou dos catadores – para sua operação. Em particular há a ideia de que se poderia reciclar todo o lixo, apesar da impossibilidade de se reciclar uma grande parte do lixo, por estar contaminado ou por falta de mercado⁹.

As várias referências e estudos de caso aqui mencionados ilustram o fato de que há perspectivas significativas para o aproveitamento energético dos RSU.

⁹ Coelho, S. 2016. Notas de aula. PECE – Programa de Educação Continuada, EPUSP, USP.

A Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo – CEAGESP - é uma empresa pública vinculada ao MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, que possui duas funções complementares e de grande importância para o comércio do Estado de São Paulo. A primeira unidade de negócio é a armazenagem dos produtos comercializados, onde existem 14 unidades ativas, equipadas com silos e graneleiros, além de equipamentos e estruturas que são utilizados na armazenagem de grãos e produtos agrícolas para futura comercialização.

A figura 5.1 ilustra a distribuição dos pontos de armazenagem pelo estado de São Paulo, locais estratégicos para a segunda unidade de negócio da empresa. Esses locais foram construídos para solucionar o problema de logística dos alimentos, já que muitos são itens frágeis e perecíveis.

Figura 5.1 - Unidades Ativas de Armazéns da CEAGESP



A segunda atividade do CEAGESP é a entrepostagem, locais para depósito e venda dos alimentos, além de serem um ponto de distribuição para feiras, supermercados e atacadistas. Atualmente são 13 entrepostos atacadistas no estado de São Paulo. A figura 5.2 ilustra os pontos de venda, que sustentam a rede de comércio local das principais cidades do estado de São Paulo.

Figura 5.2 - Unidades Ativas de Entrepostos da CEAGESP



Fonte: Site da CEAGESP - www.ceagesp.gov.br

Em todas as unidades há significativa produção de resíduos sólidos. A Tabela 5.1 apresenta uma comparação do lixo gerado, o reciclado e o lixo descartado na CEAGESP.

Tabela 5.1 - Comparação dos Resíduos da CEAGESP de 2011 até 2015

Lixo Gerado e Reciclado pela CEAGESP			
Ano	Lixo Gerado (ton)	Lixo Reciclado (ton)	Lixo Descartado (ton)
2011	55.585	14.778	40.807
2012	55.349	11.561	43.788
2013	56.387	10.731	45.656
2014	59.783	13.004	46.779
2015	60.195	14.608	45.587

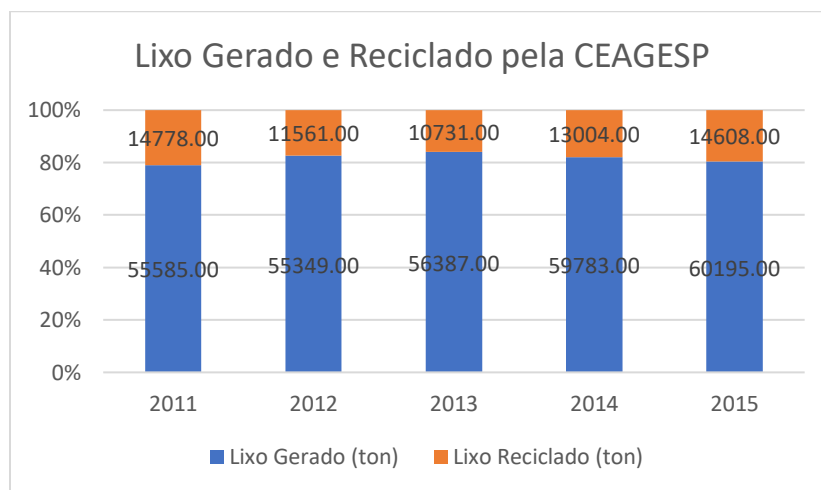
Fonte: Adaptado de CEAGESP (2016).

Os relatórios do CEAGESP (2016) existentes informam que 75,7% do lixo gerado em 2015 foi descartado; em sua maioria eles são constituídos de madeira, palha, papelão, frutas, legumes, verduras e peixes, itens que foram utilizados no transporte de alimentos e os próprios alimentos que estão fora do padrão de qualidade para venda.

Nos últimos cinco anos houve um aumento da quantidade de resíduos gerados pela CEAGESP. A razão é o aumento populacional do estado de São Paulo, uma vez que quanto maior o número de habitantes no estado, maior a geração de RSU.

Os dados relativos ao lixo gerado e reciclado da CEAGESP (2016), bem como aqueles relativos ao lixo descartado, mostram que a média dos últimos cinco anos foi estável em relação ao que foi produzido: aproximadamente 20% de todo lixo gerado é reciclado, e os outros 80% são descartados. Atualmente, a CEAGESP destina a maioria do lixo gerado para aterros sanitários, esses resíduos correspondendo 1% a 2% do total de produtos comercializados por ano.

Figura 5.3 - Lixo Gerado e Reciclado pela CEAGESP



Fonte: Autoria Própria a partir de dados da CEAGESP (2016).

Já existem políticas implementadas para melhores usos desses resíduos gerados atualmente na CEAGESP, como a reciclagem, o banco de alimentos (BCA) - que é a recuperação de alimentos descartados para alimentação de pessoas carentes - e a destinação

para aterros sanitários dos itens que não podem ser reciclados ou recuperados.

Na figura 5.4 a seguir verifica-se o aumento do lixo descartado em toneladas na CEAGESP. No ano de 2014 foram descartadas mais de 46 mil toneladas de RSU, sendo o valor mais significativo nos últimos cinco anos.

Figura 5.4 - Lixo Descartado na CEAGESP



Fonte: Autoria Própria a partir de dados da CEAGESP (2016).

A destinação de resíduos para o BCA é um caso interessante. O BCA é uma entidade sem fins lucrativos que atende os mais diversos setores de São Paulo, como ONGs, hospitais públicos, casas de recuperação, asilos, creches, centro de moradores de rua, proporcionando educação alimentícia em creches e escolas, além de boas práticas para a redução de desperdício em restaurantes e centros comerciais. A Tabela 5.2 apresenta o volume recebido, distribuído e descartado pelo BCA.

Tabela 5.2 - Volume de Alimentos do BCA de 2011 até 2015

Volume Recebido e Distribuído pelo BCA			
Ano	Vol. Recebido (ton)	Vol. Distribuído (ton)	Vol. Descartado (ton)
2011	4.332	4.065	267
2012	4.346	3.972	374
2013	3.579	3.383	196
2014	3.818	3.553	265
2015	3.316	3.005	335

Fonte: Adaptado de CEAGESP (2016).

Por se tratar de um serviço público e se caracterizar uma destinação mais nobre do que a geração de energia elétrica, considerar o volume de alimentos recolhidos pelo BCA é um grande desafio.

Na figura 5.5 tem se uma ilustração de um centro de coleta para o BCA da CEAGESP.

Figura 5.5 - Banco de Alimentos da CEAGESP



Fonte: Site da CEAGESP/BCA - www.ceagesp.gov.br

Neste contexto, a seguir será analisada a possibilidade de instalação de um sistema de aproveitamento energético dos resíduos gerados na CEAGESP, à luz da nova PNRS.

5.1 O Aproveitamento Energético dos Resíduos Gerados na CEAGESP

Nesta sessão pretende-se avaliar as condições técnicas e econômicas de um sistema de aproveitamento energético dos resíduos sólidos gerados nas instalações da CEAGESP de forma sustentável, desconsiderando a destinação de alimentos ao BCA como anteriormente descrito.

Como não foi possível se ter acesso à gravimetria dos resíduos da CEAGESP, para estimar o potencial disponível nos entrepostos, foi adotada a composição gravimétrica da CEASA de Goiás (adotando que a mesma seja similar à composição de resíduos gerados na CEAGESP). A Tabela 5.3 apresenta a composição gravimétrica da CEASA/GO.

Tabela 5.3 - Composição Gravimétrica dos resíduos da CEASA - Goiás

Composição Gravimétrica Média dos Resíduos da CEASA/GOIÁS	
Material Orgânico	68%
Madeira	19%
Papel	4%
PET	4%
Outros ¹⁰	4%
Plástico	1%
Total	100%

Fonte: RESPLANDES, JORGE, DOS SANTOS, FERREIRA, 2004

A Tabela 5.4 apresenta índices relativos ao aproveitamento energético de RSU considerando-se três tipos de tecnologias: biogás de aterro sanitário, digestão anaeróbica e incineração.

O aproveitamento energético da gaseificação não está incluído no PPE 2020 (2012), então não está incluído na Tabela 5.4. O estudo de produção de energia elétrica pela gaseificação será apresentado no capítulo seis, onde será analisado o caso da CEAGESP. O mesmo caso ocorre para o TMB, que também será analisado no capítulo 6.

¹⁰ Dentro da categoria “Outros” na Tabela 5.3 de composição gravimetria da CEASA de Goiás, estão sendo considerados os seguintes itens: vidro, pano, ferro, alumínio, nylon e borracha.

Tabela 5.4 - Aproveitamento Energético dos RSU – Plano Paulista de Energia

Aproveitamento energético dos RSU	
Tipo de Aproveitamento	Produção de energia elétrica
Biogás de aterro (Base Metano)	0.1 - 0.2 MWh/t RSU
Digestão anaeróbica acelerada	0.1 – 0.3 MWh/t RSU
Incineração RSU com geração de energia	0.4 – 0.6 MWh/t RSU

Fonte: Plano Paulista de Energia 2020 – www.energia.sp.gov.br

Através da análise do capítulo 3, onde é realizado uma revisão das tecnologias disponíveis comercialmente para tratamento de resíduo sólidos, pode-se concluir que a incineração para a quantidade de resíduos gerados na CEAGESP será inviável, pois não há incineradores neste porte disponíveis comercialmente (pois o sistema de limpeza dos gases de exaustão só se viabiliza para disponibilidade de resíduos acima de 500 t/d); no presente estudo, a disponibilidade de resíduos é de 140 t/d.

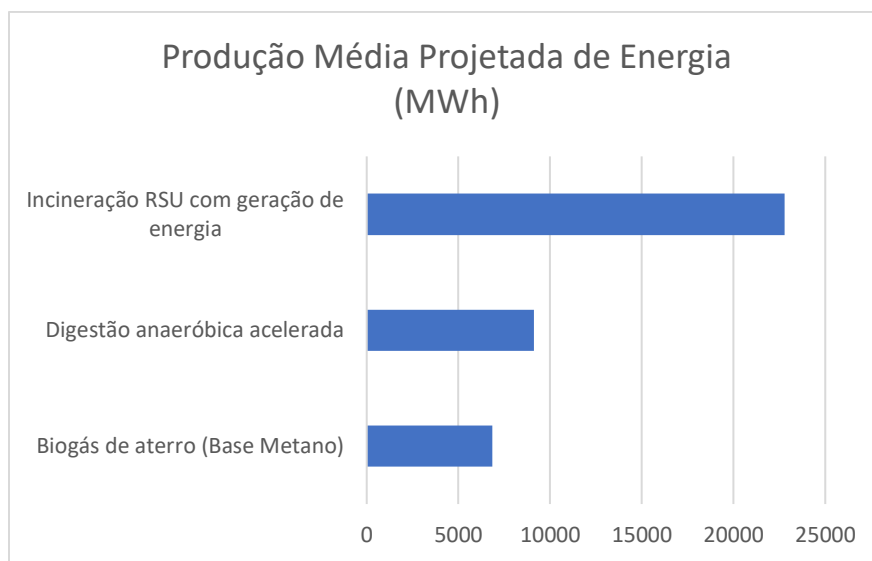
O biogás de aterro sanitário, em primeira análise, pode ser interessante, visto a gravimetria dos RSU da CEAGESP ser predominantemente orgânica, potencializando a geração de biogás, permitindo a comercialização do biometano para fins de transporte e industriais ou para a geração de energia elétrica. Entretanto, deve ser lembrado que a PNRS não permite a disposição destes resíduos em aterros sem tratamento prévio. Uma tecnologia não citada no Plano Paulista de Energia 2020 é a gaseificação, que se apresenta como uma opção para sistemas de pequeno porte (abaixo de 500 t/d); este tratamento térmico também pode gerar energia elétrica, devendo ser lembrado que o mesmo pode-se utilizar de tecnologia de empresas brasileiras, como já mencionado anteriormente neste trabalho.

No capítulo 6 a seguir será apresentada a análise técnico econômica do aproveitamento energético dos resíduos da CEAGESP comparando as tecnologias selecionadas como mais adequadas.

Na figura 5.6 é demonstrada uma projeção preliminar para a geração de energia elétrica possível de ser gerada a partir das 140 ton/dia de RSU da CEAGESP, usando apenas as

opções do Plano Paulista de Energia, sem maiores considerações econômico-financeiras. Os dados de rendimento elétrico utilizados foram do Plano Paulista de Energia de 2020 (2012), considerando a incineração com uma produção de 0.5 MWh/ton, a digestão anaeróbica acelerada com 0.2 MWh/ton e o biogás de aterro com rendimento de 0.15 MWh/ton.

Figura 5.6 - Energia Projetada para as opções tecnologias do Plano Paulista de Energia

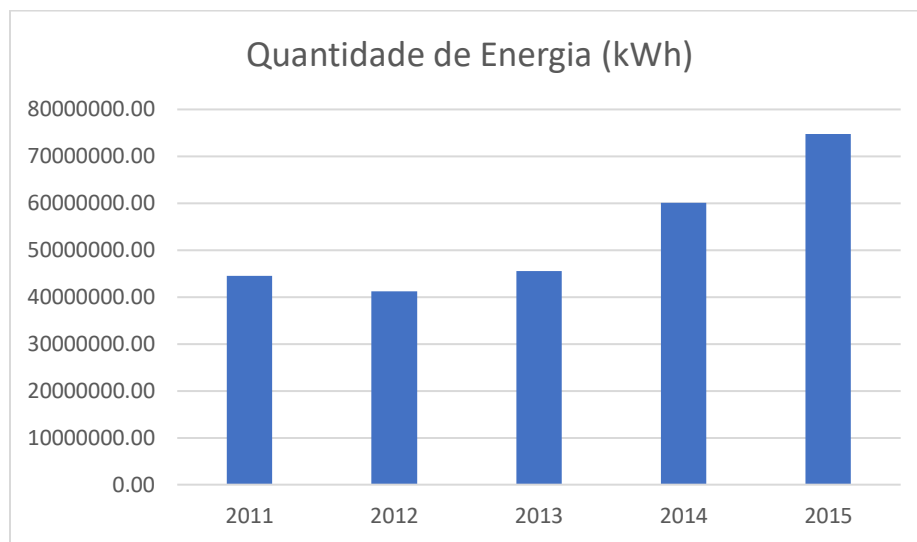


Fonte: Autoria Própria a partir de dados da CEAGESP (2016).

Observe-se que nestes cenários não estão incluídos nem o TMB nem a gaseificação. Apresenta-se aqui apenas alguns cenários teóricos a partir do estudo mencionado. A seguir, no capítulo 6, é apresentada uma análise técnico-econômica detalhada de todas as opções.

Através dos dados fornecidos em CEAGESP (2016), foi possível estimar a quantidade de energia consumida nos entrepostos e armazéns, conforme ilustra a figura 5.7 a seguir. A quantidade de energia consumida em 2015 foi de aproximadamente 75 GWh, considerando a tarifa média de R\$ 0,30/kWh. Analisando-se a figura 5.6 pode-se concluir que, mesmo considerando a projeção dos resíduos do CEAGESP pela incineração (geração de 23 GWh), o CEAGESP não seria autossuficiente em energia elétrica em seus entrepostos (consumo de 75 GWh).

Figura 5.7 - Consumo de Energia na CEAGESP



Fonte: Autoria Própria a partir de dados da CEAGESP (2016).

5.2 O novo projeto NESP e a sinergia com uma URE

O Novo Entrepasto de São Paulo (NESP) é uma alternativa para o setor de abastecimento que oferecem produtos hortifrutigranjeiros na cidade de São Paulo. O projeto tem como objetivo melhorar as condições de trabalho dos produtores e dos comerciantes, além de oferecer um sistema moderno de logística para feirantes e pequenos varejistas.

O projeto NESP, que ainda está em fase de desenvolvimento, propõe a utilização dos resíduos para a geração de energia, diferentemente da CEAGESP onde não existe tal iniciativa, parte devido ao crescimento não controlado. O novo entreposto possui a vantagem de estar propondo, desde o seu projeto básico, um modelo mais sustentável onde se utilize das ineficiências encontradas no entreposto atual.

O NESP está previsto para ser localizado no município de Perus, local estratégico para receber a frota de caminhões sem sobrecarregar as vias de transportes urbanas. O NESP também possui planos para construir um hotel dentro do complexo e um shopping-center.

Neste novo projeto seria interessante a construção também de uma URE. Devido ao seu tamanho, é provável que o empreendimento não seja autossuficiente em termos energéticos somente com base nos resíduos gerados; entretanto, esta opção se torna atrativa na o sistema de iluminação, hotelaria e comércio. Esses locais necessitam tanto de energia elétrica como térmica.

É estimado um investimento de 5 bilhões de reais para sua construção. De acordo com o NESP (2017), o projeto está dividido em 2 etapas, a primeira etapa irá contar com um novo entreposto e uma plataforma de logística de grandes volumes de cargas e veículos. A segunda etapa terá uma abordagem maior do que somente o setor hortifrutigranjeiro, abrangendo cadeias de suprimentos maiores e alimentos em geral.

A figura 5.8 ilustra como está sendo estruturado o novo entreposto.

Figura 5.13 - Projeto Arquitetônico do NESP



Fonte: Site do NESP - www.nespsa.com.br

O projeto NESP é importante para o presente estudo, por se tratar de projeto novo que objetiva resolver os problemas atualmente enfrentados na CEAGESP. O destino atual dos resíduos gerados na CEAGESP é a disposição em aterros sanitários, modelo de tratamento inadequado de acordo com a Lei nº 12.305, a PNRS.

Construir uma URE para realizar a geração de energia elétrica dentro do novo entreposto é uma solução inteligente para o tratamento dos resíduos.

Para a viabilidade financeira do empreendimento e da análise técnica dos tratamentos de RSU que podem ser utilizados no entreposto de São Paulo, foram considerados inicialmente os processos de incineração, a gaseificação, TMB e o aterro sanitário, que correspondem às opções atualmente disponíveis comercialmente no país. Observe-se que esta escolha apresenta uma maior gama de opções quando comparado com o Plano Paulista de Energia, pois inclui novas tecnologias atualmente disponibilizadas.

Para uma análise técnica do potencial de geração de energia, uma das principais informações se refere à gravimetria dos resíduos considerados. Considerando a indisponibilidade de dados referentes a CEAGESP, foi adotada a hipótese de que a gravimetria da CEAGESP seja similar ao da CEASA de Goiás. Assim, utilizando os valores de PCI (poder calorífico inferior) dos diferentes materiais a partir de SOARES (2016), obteve-se o valor do PCI total dos resíduos da CEAGESP igual a 2.117 kcal/kg, valor um pouco acima da média dos RSU do estado de SP (aproximadamente 2.000 kcal/kg).

Tabela 6.1 – Cálculo do Poder Calorífico Inferior dos resíduos na CEAGESP

Determinação do Poder Calorífico Inferior dos resíduos da CEAGESP		
Composição	Porcentagem ^a	PCI (kcal/kg) ^b
Material Orgânico	68%	1.310
Madeira	19%	2.520
Papel	4%	4.030
PET	4%	6.300
Outros ¹¹	4%	6.780
Plásticos	1%	6.300
Total	100%	2.117

Fontes: a – CEASA DE GOIAS, 2017 b -RESPLANDES, JORGE, DOS SANTOS, FERREIRA, 2004; SOARES,2016.

Os cálculos detalhados referentes ao estudo do aterro, da incineração, TMB e da gaseificação estão no anexo I - Memorial de Cálculo do Estudo de Viabilidade Técnico Financeira da CEAGESP.

(a) Disposição em aterro

A CEAGESP já se utiliza do aterro sanitário para dispor os resíduos gerados; porém após início do exercício da PNRS será necessária outra solução para a sua disposição. O estudo do aterro neste trabalho irá servir como base de comparação para os outros métodos utilizados na geração de energia elétrica, e o cálculo do potencial elétrico do aterro sanitário foi realizado a partir de IPCC (2006).

No caso da disposição em sanitário foi considerado que 100% dos resíduos são encaminhados sem reciclagem prévia, aproximando-se da realidade atual do estado de São Paulo. Para o cálculo do potencial de geração de metano foram adotadas as equações do

¹¹ Na categoria “Outros” da Tabela 6.1, por se tratar de diversos compostos como borracha e tecidos, foi adotado o valor do PCI da borracha, 6.780 kcal/kg.

IPCC (2006). A porcentagem adotada de metano no biogás foi de 50% e o PCI do biogás considerado foi de 5.500 kcal/Nm³.

No cálculo do potencial de geração de biogás por tonelada de RSU, são necessárias três variáveis: fator de correção do metano, fração de carbono degradável no lixo e quantidade de resíduos gerados. Para o fator de correção de metano foi adotado um fator unitário; esse fator corrige a geração de biogás dependendo da gestão dos resíduos coletados pelo aterro sanitário, e o valor de 0,21 foi adotado em relação a fração de carbono degradável no lixo, o que varia dependendo da gravimetria do RSU. Como a gravimetria da CEAGESP foi aproximada, foi escolhido o valor recomendado pelo IPCC (2006). Com esses dados selecionados, é possível determinar o potencial de geração de biogás, em 98 m³/t de resíduo.

Com o potencial de geração de biogás e a geração diária de 140 toneladas de resíduo pela CEAGESP, obtém-se um potencial de produção anual de eletricidade (como biogás de aterro) de 6.936 MWh, para uma produção diária de 13.698 m³ de gás metano e com uma potência instalada de 1 MW.

Em relação aos custos de operação e investimento no aterro sanitário, foram considerados os valores de SOARES (2016). Os valores coletados são referentes ao CTR de Caieiras, demonstrando os valores de investimento inicial, operação, interligação com a concessionária local e valor na captação do RSU, os dados do estudo de SOARES (2016) consideram o tratamento de 1000 toneladas de RSU por dia.

Tabela 6.2 – Dados do estudo técnico financeiro considerando aterro sanitário

Aterro Sanitário		Unidade	Fonte
Potência Instalada	1	MW	
Geração de RSU	140	t/dia	CEAGESP,2016
Potencial de Geração de Biogás	13.698	Nm³ CH4/dia	
PCI do Biogás	5.500	kcal/ Nm³ CH4	Carbogás,2017
Potencial do Biogás	97.66	Nm³ CH4/t RSU	IPCC,2006
Produção Anual de Eletricidade	6.936	MWh	
Valor Base do Investimento	615.45	R\$/MWh	SOARES,2016
Valor Total do Investimento	4.268.500	R\$	
Valor Base de Operação	543.50	R\$/MWh	SOARES,2016
Valor Anual de Operação	3.769.485	R\$	
Valor Base de Interligação	11.14	R\$/MWh	SOARES,2016
Valor Anual de Interligação	77.262	R\$	
Valor Base de Recebimento dos Resíduos	905	R\$/MWh	SOARES,2016
Valor Anual de Recebimento dos Resíduos	6.276.696	R\$	
Preço de Venda da Eletricidade	140	R\$/MWh	SOARES,2016
Taxa de Desconto	12	%	SOARES,2016
Fator de Capacidade	95	%	
Operação	30	Anos	SOARES,2016
VPL	23.126.611	R\$	

Fonte: Diversos autores, referência na tabela 6.2

Realizando o cálculo do VPL para o aterro sanitário, chegamos ao valor de R\$23.126.611, um resultado que demonstra uma viabilidade financeira positiva. No estudo foi adotada uma operação de 30 anos na coleta e tratamentos do biogás, um preço de venda da eletricidade gerada de R\$140,00/MWh e uma taxa de desconto de 12 por cento ao ano.

(b) Incineração

Em relação ao tratamento dos resíduos por incineração, na análise realizada considerou a taxa de conversão energética, com o valor médio de 0.5 MWh/t de resíduo (PPE, 2012), onde a geração elétrica calculada foi de 22.794 MWh por ano e obteve-se uma potência instalada de 3 MW.

Como conclusão preliminar, pode-se afirmar que a CEAGESP não gera resíduos o suficiente para alimentar uma usina de incineração; conforme mencionado anteriormente, é necessária uma geração diária mínima de 500 toneladas de RSU para que o projeto se torne viável, visto que o investimento inicial e os custos de operação da URE por incineração são valores altos e que somente se justificam através de coletas de maiores quantidades de resíduos.

De fato, na análise econômico-financeira do tratamento pela incineração, obteve um VPL negativo (-R\$74.527.591), adotando-se um preço de venda de R\$140/MWh, uma operação de 30 anos e uma taxa de desconto de 12 por cento. De fato, os estudos anteriores da Secretaria de Energia indicam um custo de geração de R\$ 300/MWh para uma planta de grande porte (Coelho, 2016), o que confirma a inviabilidade para um preço de venda de 140R\$/MWh.

A Tabela 6.3 ilustra os principais resultados para o tratamento dos resíduos com o processo de incineração.

Tabela 6.3 - Dados do estudo técnico financeiro considerando incineração

Incineração		Unidade	Fonte
Potência Instalada	3	MW	
Geração de RSU	140	t/dia	CEAGESP,2016
Aproveitamento Energético	0.5	MWh/ t RSU	PPE,2012
Valor para destinação em aterro sanitário	80	R\$/t	COELHO,2016
Valor Anual para destinação em aterro	3.646.960	R\$	
Produção Elétrica	22.794	MWh/ano	
Valor Base do Investimento	630.000	R\$/t RSU/dia	INFIESTA,2015
Investimento Inicial	88.368.646	R\$	
Valor Base de Operação	36.500	R\$/t RSU/dia	INFIESTA,2015
Valor Anual de Operação	5.119.770	R\$	
Preço de Venda de Energia Elétrica	140	R\$/MWh	SOARES,2016
Taxa de Desconto	12	%	SOARES,2016
Operação	30	Anos	SOARES,2016
VPL	- 74.527.590,84	R\$	

Fonte: Diversos Autores, referência tabela 6.3

(c) Gaseificação:

No processo de gaseificação para aproveitamento energético dos resíduos da CEAGESP, foi necessário analisar a produção do combustível de resíduo sólido – CDR (RDF – refused derived fuel), o que é necessário para alimentação dos resíduos no gaseificador. Em seguida, foi considerada a conversão do gás de síntese gerado em energia elétrica.

O valor adotado para conversão de RSU para CDR foi de 0.5 toneladas de CDR por tonelada de RSU e um PCI de 4.200 kcal/kg (Carbogás, 2017). Apesar da diferença da gravimetria do RSU e dos resíduos coletados na CEAGESP, foi adotada a mesma relação de CDR produzido por RSU, por falta de maiores informações detalhadas. Considerando uma produção diária de 140 toneladas de resíduos na CEAGESP, tem-se o valor de 70 t/d de CDR para alimentar o gaseificador. Com uma taxa de conversão de 75% durante a gaseificação e um PCI de 1.160 kcal/Nm³ para o gás de síntese, obteve-se uma geração de 7.920 metros cúbicos por hora de gás.

Alimentando um sistema de caldeira e turbina a vapor, obtém-se a geração anual de 19.284 MWh, ou 19,284 GWh.

No ano de 2015 o consumo de energia elétrica do CEAGEP foi de aproximadamente 75GWh; caso o entreposto utilizasse a gaseificação para tratar os resíduos, seriam evitados os custos de transporte para aterros sanitários e a CEAGESP ainda atenderia 25% de sua demanda por eletricidade.

Considerando o custo de disposição de RSU em R\$80 por tonelada, seria economizado R\$3.646.960 por ano com descarte de resíduos no CEAGESP, além dos custos de transporte para o aterro (informação não possível de ser obtida no presente estudo).

Os valores da venda de energia elétrica, do investimento inicial e dos custos de operação foram baseados no estudo de INFIESTA (2015). O VPL obtido foi de R\$18.354.630,

demonstrando ser um projeto viável para ser utilizado na CEAGESP quando se utilizar o processo de gaseificação.

A Tabela 6.4 lista os principais valores obtidos para o processo de gaseificação dos resíduos da CEAGESP.

Tabela 6.4 - Resultados de estudos técnico financeiros considerando gaseificação

Gaseificação		Unidade	Fonte
Potência instalada	3	MW	
Geração de resíduos	140	t/dia	CEAGESP,2016
Taxa de Conversão de CDR	0.5	t CDR/t de resíduo	Carbogás,2017
Geração de CDR	70	t/dia	
PCI do CDR	4.200	kcal/kg	Carbogás,2017
PCI do Gás de Síntese	1.160	kcal/Nm ³	INFIESTA,2015
Geração de Gás de Síntese	7.920	Nm ³ /hora	
Conversão da Gaseificação	75	%	INFIESTA,2015
Produção Elétrica Anual	19.284	MWh	
Valor para destinação em aterro sanitário	80	R\$/t	COELHO,2016
Valor Anual para destinação em aterro	3.646.960	R\$	
Valor Base de Operação	18.560	R\$/ t resíduo/dia	INFIESTA,2015
Custo Anual de Operação	2.598.400	R\$	
Valor Base de Investimento	167.777	R\$/t resíduo/dia	INFIESTA,2015
Investimento Inicial	23.488.780	R\$	
Taxa de Desconto	12	%	SOARES,2016
Fator de Capacidade	95	%	INFIESTA,2015
Fator de Carga	87	%	INFIESTA,2015
Rendimento Moto Gerador	28	%	INFIESTA,2015
Operação	30	Anos	SOARES,2016
VPL	18.354.629,80	R\$	

Fonte: Diversos Autores, referência na coluna direita da tabela 6.4

(d) Tratamento Mecânico Biológico (TMB)

No tratamento de RSU por TMB é necessário realizar a separação do material orgânico e não orgânico. Depois é necessário verificar qual tipo de tratamento térmico e biológico será adotado para cada tipo de resíduo.

Como discutido no capítulo 3, no tratamento biológico pode-se utilizar da compostagem ou da decomposição anaeróbica. Como neste caso o objetivo é a geração de energia elétrica, esse estudo adota que a parte orgânica do resíduo é encaminhada para um biodigestor, com geração de biogás.

O material não orgânico pode ser reciclado ou utilizado na alimentação de um dos tratamentos térmicos, como gaseificação. Entretanto, esse estudo considera que os materiais não orgânicos serão vendidos para reciclagem em sua totalidade, de forma que a receita obtida com a venda desses resíduos, possa suprir os custos da separação dos materiais orgânicos e não orgânicos. Assim sendo, é necessário realizar apenas o estudo do potencial de geração de biogás, a sua venda para a concessionária local, os custos de investimento inicial para o biodigestor e os custos de manutenção.

Para levantar os dados do potencial de geração de biogás, será utilizado o método do IPCC (2006), mesmo modelo que o presente estudo adotou para o aterro sanitário.

Por se tratar de um modelo de tratamento de resíduos, onde será somente utilizado resíduos orgânicos, o potencial de geração de biogás é alterado. A fração de carbono degradável no lixo é 0,15 de acordo com o IPCC (2006) quando 100% dos resíduos são de origem orgânica; sendo assim o potencial de geração de biogás foi alterado para 69,75 Nm³/t de resíduo.

Considerando a gravimetria do CEASA/GO, onde a composição do material orgânico é

de 68%, tem-se uma geração de 95 t/dia de resíduos orgânicos.

Considerando o potencial de biogás calculado em 69,75 Nm³/t resíduo por dia e a quantidade de lixo orgânico tratado de 95 t/dia, temos a geração diária de 6.653 Nm³ de metano (CH₄).

Considerando o PCI do biogás em 5.500 kcal/m³ CH₄, a geração diária de 6.653 m³ de CH₄ e um rendimento do moto gerador de 28%, temos uma potência instalada de 0,5 MW. Considerando uma taxa de operação de 7800 horas por ano e um fator de carga de 28%, temos uma geração de energia elétrica anual de 3.369 MWh.

Para os valores de viabilidade financeira foram considerando o estudo de LEITE (2014). O estudo de LEITE (2014) considera o tratamento de 1000 t de RSU/dia onde, se for utilizado o TMB, seriam necessários R\$140 milhões de reais em investimento inicial e R\$25 milhões de reais em taxas de operação. Realizando uma aproximação linear, chegamos ao valor de investimento inicial de R\$140.000/ tonelada de RSU por dia e uma taxa de operação de R\$25.000/ tonelada de RSU por dia.

Aplicando esses valores acima no estudo do TMB e considerando uma taxa de desconto de 12%, é calculado o VPL de R\$614.433,00.

Na tabela 6.5 estão listados os principais dados do estudo técnico financeiro, considerando o tratamento dos resíduos do CEAGESP através do TMB.

Tabela 6.5 – Dados do estudo técnico financeiro considerando TMB

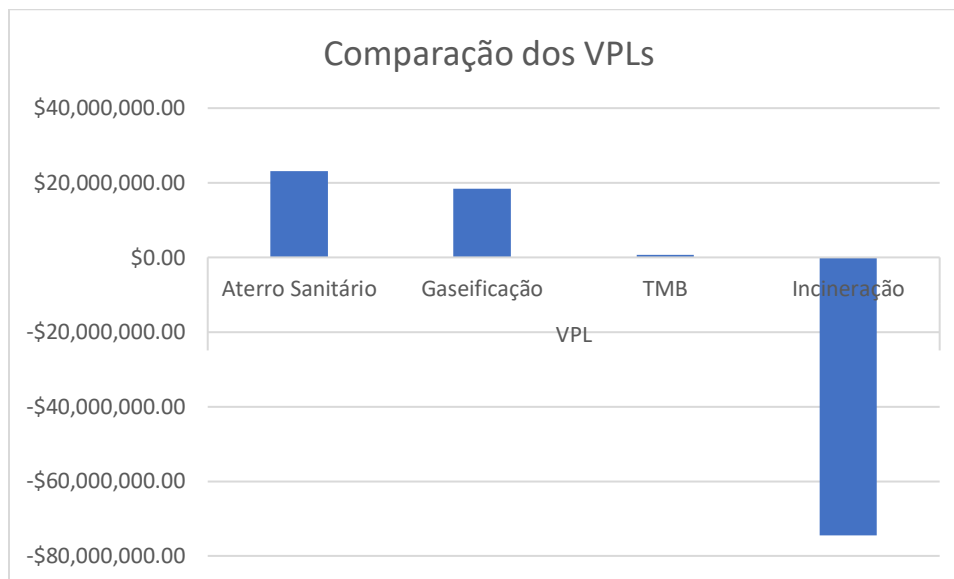
TMB		Unidade	Fonte
Potência Instalada	0.5	MW	
Geração de Resíduo	140	t/dia	CEAGESP,2016
Porcentagem de Resíduo Orgânico	68	%	RESPLANDES, JORGE, DOS SANTOS, FERREIRA, 2004
Geração de Resíduo Orgânico	95	t/dia	
Potencial de Geração de Biogás	6.653	Nm³ CH4/dia	
Valor para destinação em aterro sanitário	80	R\$/t	COELHO,2016
Valor Anual para destinação em aterro	3.646.960	R\$	
Potencial de Biogás	69.75	Nm³ CH4/t RSU	IPCC,2006
PCI do Biogás	5.500	kcal/ Nm³ CH4	Carbogás, 2017
Produção Anual de Eletricidade	3.369	MWh	
Valor Base do Investimento	140.000	R\$/t resíduos/dia	LEITE, 2014
Valor Total do Investimento	13.353.484,31	R\$	
Valor Base de Operação	25.000	R\$/t resíduos/dia	LEITE, 2014
Valor Anual de Operação	2.384.550,77	R\$	
Preço de Venda da Eletricidade	140	R\$/MWh	SOARES, 2016
Taxa de Desconto	12	%	SOARES, 2016
Fator de Capacidade	95	%	
Operação	30	Anos	SOARES, 2016
VPL	614.433	R\$	

Fonte: Diversos autores, referência na tabela 6.5

(e) Resultados obtidos:

A figura 6.1 ilustra a comparação dos resultados obtidos na comparação dos quatro processos adotados para o estudo de aproveitamento energético dos resíduos da CEAGESP (disposição em aterro, incineração, TMB e gaseificação).

Figura 6.1 – VPL descontado dos 4 métodos (O VPL do TMB em comparação aos outros métodos analisados é muito menor, assim a sua coluna está de difícil visualização na figura abaixo)



Fonte: Autoria Própria

Com os valores calculados de VPL, pode-se afirmar que o aterro sanitário e a gaseificação são as únicas opções viáveis para tratamento dos resíduos da CEAGESP. Entretanto o aterro sanitário é apenas um modelo comparativo de tratamento, como apresentado no capítulo 3 pois, após o início do exercício da PNRS, o modelo de aterro sanitário não será mais adequado para a disposição dos RSU.

A incineração, como previsto no capítulo 3, de fato não é a melhor solução para o tratamento dos resíduos, pois a geração de resíduos na CEAGESP é insuficiente, sendo traduzido pelo VPL negativo do estudo financeiro.

O TMB é uma solução possível de ser utilizada no tratamento dos resíduos do CEAGESP, tanto na abordagem técnica como financeira; entretanto, não existem UREs em

operação no Brasil que se utilizem dessa tecnologia.

A gaseificação, portanto, se apresenta como a melhor solução para o tratamento dos resíduos da CEAGESP. Além de ser um tratamento que gera energia elétrica, contribuindo para suprir parcialmente o consumo de eletricidade da unidade, a mesma está de acordo com a PNRS, realizando um aproveitamento energético dos resíduos descartados.

A análise de propostas de políticas e incentivos públicos aqui apresentada é baseada em ABRELPE (2016), nos estudos da empresa de pesquisa energética (EPEa, EPEb, 2014), nos dados dos relatórios do PPE 2020 (PPE,2012) e nos relatórios de gestão da CEAGESP (CEAGESP, 2015).

A proposta do PPE 2020 (PPE,2012) é atingir o saneamento básico de 100% do esgoto dos municípios de São Paulo. Existem casos como a de Franca onde 100% do esgoto já é tratado, possibilitando não somente a melhora da qualidade de vida e da saúde pública, como uma fonte para as estações de tratamento de esgoto gerarem energia elétrica com os compostos orgânicos coletados. O estado de São Paulo é o segundo estado melhor colocado em relação aos efluentes gerados no país, onde aproximadamente 70% é coletado.

A segunda meta é de atingir 20% das contratações públicas em conformidade com os padrões de referência socioambientais.

Para alcançar as duas metas propostas é analisado um conjunto de ações relacionados aos impostos de ICMS e taxas de incentivo:

- Deferimento do imposto incidente nas saídas de comercialização de itens reciclados como papel, sucata de metal, vidro, resíduos plásticos, PET e borrachas.
- Isenção de imposto na saída de óleo lubrificante usado ou contaminado para empresas registradas que gerem saboeira e biodiesel.
- Isenção de imposto na devolução impositiva de embalagens de agrotóxicos.
- Isenção de imposto na saída de pilhas e baterias usadas que contém metais pesados como chumbo, mercúrio e cádmio.

Na lei nº 12.305/2010, que instituiu a PNRS, fica estabelecida a responsabilidade compartilhada, que torna todos os envolvidos na cadeia produtiva e de consumo como

responsáveis pela destinação dos resíduos gerados. Com a proibição dos lixões a céu aberto, isso irá exigir do poder público a fiscalização dessas áreas assim como as obras que realizam o tratamento dos resíduos (EPEa, 2014).

Para realizar as adequações da destinação do RSU, foram criados os Planos de Resíduos, que englobam toda a esfera do poder executivo, ou seja, o poder federal, estadual e municipal. O plano federal deve ter uma visão de 20 anos, sendo necessário publicar outro plano a cada 5 anos; no plano estadual é necessária uma visão de 10 anos com uma republicação a cada 2 anos; e, no plano municipal, uma visão de 5 anos com republicação anual (EPEb ,2014).

A Tabela 7.1 lista as políticas intermunicipais para a geração de energia elétrica através dos RSU e o modelo de negócio com participação de municípios onde a geração de resíduos necessária para a alimentação de uma usina de gaseificação não é suficiente; cooperativas intermunicipais podem se tornar interessante para a construção de URE, onde é alimentada por resíduos dos municípios.

É, portanto, fundamental aprimorar a quantidade de informações legais para a análise do modelo de negócio de modo a facilitar os estudos pelo setor privado e acadêmico.

Tabela 7.1 - Políticas Estaduais voltados para Recuperação Energética com RSU

Tema	Proposta	Instrumentos Necessários	Benefícios
Recuperação Energética (RSU)	Modelagem do negócio por Convênios Estado-Municípios, com participação da iniciativa privada	Grupo de Trabalho Multidisciplinar	Destinação adequada dos RSU
Recuperação Energética (RSU)	Aprimorar arcabouço legal específico para a efetivação da modelagem de negócio	Grupo de Trabalho Multidisciplinar	Destinação adequada dos RSU

Fonte: Plano Paulista de Energia 2020 – www.energia.sp.gov.br

A Tabela 7.2 lista alguns projetos em andamento na CEAGESP, como a criação de indicadores para mensurar a composição gravimétrica do lixo descartado e analisar o impacto gerado pelo transporte dos produtos até os armazéns auxiliam no controle interno de impacto ambiental da empresa.

Como este trabalho sugere, deve-se analisar outra destinação dos resíduos gerados além do aterro sanitário, como recuperação energética.

Tabela 7.2 – Projetos em Andamento na CEAGESP

Setor Responsável dentro do CEAGESP	Projeto
PRES (Presidência)	Criar sistema de Indicadores de acompanhamento das políticas de sustentabilidade
	Desenvolver programa de tratamento e destinação dos resíduos sólidos
	Combate ao desperdício – Conforme Lei de Resíduos Sólidos

Fonte: Adaptada da CEAGESP (2016).

Os projetos de pesquisa e desenvolvimento melhoram a confiabilidade, principalmente do setor privado, quando são necessários vários fatores, tais como a captação de recursos financeiros, o desenvolvimento de equipamentos e processos de menor impacto e que possibilitem maiores retornos aos investidores.

Também, são necessárias linhas de crédito especiais para a geração de energia com fontes renováveis, em particular o aproveitamento energético de RSU.

A revisão das taxas de ICMS para a cadeia de produção de energia limpa certamente é uma opção interessante, bem como a criação de grupos que integrem na discussão o setor privado.

Tabela 7.3 - Políticas Estaduais voltados para Fontes Renováveis

Tema	Proposta	Instrumentos Necessários	Benefícios
Licenciamento	Estabelecer práticas de licenciamento simplificadas e padronizadas, em especial para questões relacionadas a financiamento de projetos.	Grupo de Trabalho envolvendo agentes produtores, órgãos de financiamento e poder público	Agilização da implantação de unidades produtoras e de fornecimento de matérias primas.
Desenvolvimento Tecnológico	Investir em pesquisas voltadas à confiabilidade, aumento da eficiência e da competitividade das fontes renováveis.	Vinculação de recursos públicos e privados voltados à pesquisa e desenvolvimento.	Aumento da oferta de energia elétrica de fontes limpas.
Linhas de Financiamento Específicas para Produção	Facilitar o acesso a linhas de financiamento aos setores de produção envolvidos.	Linhas de financiamento específicas por meio de instituições de fomento estadual e federal.	Viabilizar o crescimento da oferta no mercado estadual.
Análise Tributária	Viabilizar incentivos fiscais para aquisição de ativos de implantação ou renovação de empreendimentos de produção.	Estabelecer convênios Confaz-ICMS.	Aumento da atratividade em setores energéticos estratégicos, sem perda de arrecadação considerando toda a cadeia produtiva.
Análise Tributária	Viabilizar absorção de créditos de ICMS ao longo de toda a cadeia produtiva.	Criar Grupos Técnicos, com a participação da iniciativa privada, para formulação de propostas que serão discutidas nos 3 níveis de Governo	Aumento da competitividade de energias renováveis.
Participação do Estado (Solar e Eólica)	Estabelecer a obrigatoriedade da instalação de aquecedores solar térmicos, células fotovoltaicas e micro geradores eólicos em locais de uso comum de todos os conjuntos habitacionais financiados com recursos públicos.	Regulamentação.	Tornar o Estado de São Paulo referência sobre a utilização de energias solar e eólica.

Fonte: Plano Paulista de Energia 2020 – www.energia.sp.gov.br

O presente estudo analisou as possíveis opções para a utilização dos resíduos gerados dentro da CEAGESP visando o seu aproveitamento energético.

Os processos aqui analisados foram a incineração, a gaseificação, TMB e a disposição em aterro sanitário, sendo analisado cada modelo com as suas vantagens e desvantagens.

O modelo de aterro sanitário utilizado na CEAGESP atualmente não poderá ser uma solução quando a Política Nacional de Resíduos Sólidos entrar em vigor, sendo necessária outra solução para o tratamento desses resíduos.

Segundo os resultados aqui obtidos, a tecnologia de gaseificação pode ser interessante para a CEAGESP. Este é um processo indicado para sistemas de pequeno e médio porte (com possibilidade de ser usado em pequenos municípios ou em consórcios intermunicipais, como proposto em vários estudos e analisados neste trabalho) onde a geração de resíduos não é tão elevada, característica também encontrada na quantidade de resíduos gerados pelo entreposto.

O presente estudo concluiu pela opção do processo de gaseificação, que parece ser o mais indicado para uma geração diária de 140 toneladas de resíduos na CEAGESP. O potencial para a URE por gaseificação foi estimado para uma potência instalada de 3 MW e uma geração anual de energia elétrica de 19.284 MWh. Considerando uma operação de 30 anos, uma taxa de desconto de 12%, tem-se o VPL de R\$18.354.629 conforme detalhado no capítulo 6.

Em relação ao tratamento pela incineração, não há geração suficiente de resíduos para sua aplicação, pois o mesmo se aplica apenas para quantidades acima de 500 toneladas de RSU diários.

Apesar dos resultados preliminares serem bastante interessantes, apontando para perspectivas mais adequadas de destinação dos resíduos do CEAGESP, este trabalho enfrentou dificuldades de acesso a dados técnicos mais detalhados sobre o caso da CEAGESP, como a gravimetria dos resíduos gerados.

Para valores mais exatos, seria necessário confirmar se a gravimetria da CEAGESP realmente é similar ao da CEASA de Goiás, já que pode haver diferenças na composição do resíduo gerado.

De qualquer forma este estudo de caso permite vislumbrar potenciais estudos futuros mais detalhados, baseados em levantamentos de dados de campo e com resultados mais precisos para a destinação e o aproveitamento energético do CEAGESP.

Referências Bibliográficas:

ABRELPE. Roteiro para Encerramento de Lixões – Os lugares mais Poluídos do Mundo. São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em:< <http://www.abrelpe.org.br>>. Acesso em: 18 setembro 2017.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Energia Assegurada, Distrito Federal, Brasília, 2005. Disponível em:<<http://www2.aneel.gov.br>>. Acesso em: 12 setembro 2017.

ANP – Agência Nacional do Petróleo Portaria N°116, de 5 de julho de 2000 Distrito Federal, Brasília, 2000. Disponível em:<<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 14 setembro 2017.

ATLAS, Tratamento do Biogás (Siloxanos), 2017. Disponível em:<<http://www.atlasseis.com>>. Acesso em: 02 outubro 2017.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2017 (BEN 2017), São Paulo, 2017. Disponível em:< <http://www.ben.epe.gov.br>>. Acesso em: 22 julho 2017.

CALVE, L. H. Potencial de Geração de Energia a Partir de RSU nos municípios do Estado de São Paulo. 2016. 71 f. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2016.

CEAGESP, PRESTAÇÃO DE CONTAS ORDINÁRIA ANUAL: RELATÓRIO DE GESTÃO DO EXERCÍCIO 2015, São Paulo, 2016. Disponível em:< <http://www.ceagesp.gov.br>>. Acesso em: 01 maio 2017.

CEASA DE GOIAS, Goiás, 2017. Disponível em:< <http://www.ceasa.goias.gov.br/>>. Acesso em: 01 outubro 2017.

CETESB – Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos 2015. Disponível em:< <http://residuossolidos.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 12 setembro 2017.

COELHO, S. T. “Mecanismos para Implementação da Cogeração de eletricidade a partir de Biomassa. Um modelo para o Estado de São Paulo”. 1999. 278 f. Tese (Doutorado em Energia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1999.

COELHO, S.T. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS. 2016. São Paulo. Disponível em: <www.pecepoli.com.br>. Acesso em: 07 setembro 2017.

DA SILVA, C. M. Gestão de Resíduos Sólidos na CEAGESP. 2014. 86 f. Monografia (Especialização em Gestão Pública) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná. 2014.

DE CAMPOS, T. Logística Reversa: Aplicação ao Problema das Embalagens da CEAGESP. 2006. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.

DE CASTRO, A. M. Aproveitamento energético de resíduos de serviços de saúde em São Paulo. 2016. 58 f. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2016.

DO AMARAL, A.C. Barreiras e propostas de políticas de inserção da Biomassa como fonte de energia 2014. 61 f. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014.

DO NASCIMENTO, A. L. Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: os Desafios da Implementação da Usina de Recuperação Energética. 2012. 72 f. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2012.

EPEa – Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica DEA 16/14 Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em:< <http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 14 setembro 2017.

EPEb – Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica DEA 18/14 Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em:< <http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 14 setembro 2017.

FAO – FOOD LOSS AND FOOD WASTE, Quebec, Canada, 2017. Disponível em: < <http://www.fao.org/food-loss-and-food-waste/en/>>. Acesso em: 07 setembro 2017.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente, Estudo do estado da arte e análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental da implementação de uma usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica no estado de Minas Gerais, Relatórios 1 e 2, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2010. Disponível em:< <http://www.feam.br>>. Acesso em: 12 setembro 2017.

GARCILASSO, V.P. BIOGÁS: ALTERNATIVA ENERGÉTICA. 2016. São Paulo. Disponível em: <www.pecepoli.com.br>. Acesso em: 07 setembro 2017.

GOULART, Eduardo A.; MARIOTONI, Carlos A.; SANCHEZ, Caio G. A utilização da gaseificação de pneus usados em leito fluidizado para a produção de energéticos. Polímeros, São Carlos, v.9, Dec. 1999. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em 22 julho 2017.

HAZTEC, Soluções Ambientais Completas, 2017. Disponível em:< <https://www.haztec.com.br>>. Acesso em: 20 setembro 2017.

IEA – International Energy Agency. Energy and Air Pollution Paris, France, 2016. Disponível em:< <https://www.iea.org>>. Acesso em: 14 setembro 2017.

INFIESA, L. R. Gaseificação de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Vale do Paranapanema – Projeto CIVAP. 2015. 122 f. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2015.

IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventors Volume 5 Waste, 2006

Disponível em:< [https:// www.ipcc-nggip.iges.or.jp](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp)>. Acesso em: 20 setembro 2017.

IRENA, RETHinking Energy 2017. Disponível em:< [https:// www.irena.org](https://www.irena.org)>. Acesso em: 20 setembro 2017.

LANZIANI, R. L. Estudo de Caso das Alternativas para Recuperação Energética dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados na Região Metropolitana de Campinas.2014. 54 f. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014.

LEITE, C. B. Tratamento de Resíduos Sólidos com Aproveitamento Energético: Avaliação Comparativa entre as Tecnologias de Biodigestão e Incineração. 2014. 45 f. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014.

LIMA, N.S. Estudo do Tratamento Mecânico-Biológico de Resíduos Sólidos Urbanos. 2014. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e Ambiente) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014.

LOUREIRO, C. A. B. Avaliação da estabilidade biológica de combustível derivado de resíduo. Lisboa, 2010.

MANSUR, G.L. O que é Preciso Saber Sobre Limpeza Urbana Rio de Janeiro: IBAM/MBES, 1993.

MIRANDA, L. H. T. G. Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso no Município de Itanhaém-SP. 2014. 121 f. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014.

MMA – Ministérios do Meio Ambiente Resolução N°382, de 26 de dezembro de 2006 Distrito Federal, Brasília, 2006. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 14 setembro

2017.

NASCIMENTO, F.S. Desenvolvimento de protótipo de gaseificador de resíduos combustíveis em leito horizontal. 2014. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2014.

NESP, Novo Entrepósito de São Paulo. 2017 São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em:<<http://www.nespsa.com.br>>. Acesso em: 15 setembro 2017.

NETO, P. N. Resíduos Sólidos Urbanos: Perspectivas de Gestão Intermunicipal em Regiões Metropolitanas. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2013.

PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL, São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br>>. Acesso em: 01 maio 2017.

PLANO PAULISTA DE ENERGIA PPE 2020, São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br>>. Acesso em: 01 maio 2017.

RAMOS, André Luis Dantas et al. Atual estágio de desenvolvimento da tecnologia GTL e perspectivas para o Brasil. Quím. Nova, São Paulo, v. 34, n. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em 22 julho 2017.

REIS, L. B. dos; SANTOS, E. C. Energia Elétrica e Sustentabilidade: Aspectos tecnológicos, socioambientais e legais.2. ed. Barueri, São Paulo: Manole,2014.

RENEWABLES 2017 GLOBAL STATUS REPORT (REN21), Paris, France, 2017. Disponível em: < <http://www.ren21.net>>. Acesso em: 15 maio 2017.

RESPLANDES, H.M.S.; JORGE, L.N.; DOS SANTOS, L.M.; FERREIRA, M.M.B. Caracterização Física dos Resíduos Sólidos da Centrais de Abastecimento de Goiás S/A – CEASA/GO. 2004. 20 f. Departamento de Engenharia – Engenharia Ambiental, Universidade Católica de Goiás, Goiânia. 2004.

ROMERO, B. C. Análise da Localização de Plataforma Logística: aplicação ao caso do ETSP – Entrepasto Terminal São Paulo – da CEAGESP. 2006. 156 F. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistema Logísticos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLOM, M.; VERVAEREN, H.; Techniques for transformation of biogas to biomethane. Biomass and Bioenergy, nº35, p. 1633-1645. 2011.

SECRETARIA DE ENERGIA E MINERAÇÃO – Governo do Estado de São Paulo. 2017. Disponível em:< <http://www.energia.sp.gov.br> >. Acesso em: 20 setembro 2017.

SILVA, C. A.; ANDREOLI, C. V. Compostagem como alternativa à disposição final dos resíduos sólidos gerados na CEASA CURITIBA/PR. 2010.

SIMÕES-MOREIRA, J. R. Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

SMA – Secretária de Estado do Meio Ambiente. Resolução SMA N°79, de 04 de novembro de 2009 Distrito Federal, Brasília, 2009. Disponível em:< <http://arquivos.ambiente.sp.gov.br>>. Acesso em: 14 setembro 2017.

SOARES, F. R. Impacto Ambiental de Tecnologias de Tratamento e Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos, 268 p., Jundiaí, Paco Editorial, 2016.

SOARES, F.R. Impacto Ambiental de Tecnologias de Tratamento e Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos. Jundiaí, Paco Editorial, 2016.

URATANI, C. L. T.; PALMA, J. B. de; SCHULTZE, R. F. Estudo de Concepção de um Sistema de Tratamento para os Resíduos Sólidos Orgânicos da CEAGESP. 2014. 127 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014.

(a) Aterro Sanitário

Cálculo do Potencial de metano

$$Lo = \frac{MCF \times DOC \times DOC_f \times F \times 16/12}{0,0007168} \text{ (IPCC,2006)}$$

Lo – Potencial de geração de metano do resíduo, $\frac{Nm^3}{t\ RSU}$

MCF – Fator de Correção de Metano = 1,0

DOC – Fração de Carbono Orgânico Degradável no Lixo = 0,21

DOC_f – Fração do DOC que pode se decompor = 0,5

F – Porcentagem de CH₄ presente no biogás = 50%

$\frac{16}{12}$ – Conversão de Carbono para Metano

Se considerarmos a composição da CEASA de Goiás para o cálculo do DOC, temos:

$$DOC = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,3 \times D) \text{ (IPCC,2006)}$$

A – Fração de papel e tecido no RSU

B – Fração de resíduos não orgânicos no RSU

C – Fração de alimentos no RSU

D – Fração de madeira no RSU

$$DOC = (0,4 \times 0,08) + (0,17 \times 0,05) + (0,15 \times 0,68) + (0,3 \times 0,19)$$

$$DOC = 0,2$$

O valor calculado 0.2 foi muito próximo ao valor recomendado pelo IPCC (2006), por se tratar de uma aproximação entre a gravimetria da CEAGESP e da CEASA de Goiás, o valor adotado foi o do IPCC (2006), de 0.21 de carbono degradável no lixo.

Cálculo do Potencial de metano e Geração de metano

$$Lo = \frac{1,0 \times 0,21 \times 0,5 \times 0,5 \times 16/12}{0,0007168}$$

$$Lo = 97,66 \frac{Nm^3}{t \text{ RSU}}$$

Potencial de geração de Metano por dia

$$140 \frac{t}{dia} \cdot 97,66 \frac{Nm^3}{t}$$
$$13.698 Nm^3$$

Cálculo da Potência

$$Potência = \frac{Q \times PCI(biogás) \times \eta}{860.000}$$

$$Q - \text{Vazão Biogás} \left(\frac{m^3}{h} \right)$$

$$PCI(Biogás) = 5.500 \left(\frac{kcal}{Nm^3 CH_4} \right)$$

$$\eta - \text{Eficiência do Motor (Ciclo Otto)}$$

$$\frac{\frac{13.698}{24} \times 5.500 \times 0.28}{860.000}$$
$$1 \text{ MW}$$

Cálculo de Produção Elétrica

$$Energia = \text{Tempo de Operação} \times \text{Potência} \times \text{Fator de Carga}$$

$$\text{Fator de Carga} = 87\%$$

$$\text{Tempo de Operação} = 7800h$$

$$6.936 \text{ MWh}$$

Adotando os valores de viabilidade econômica de SOARES (2016)

Valor do Investimento

$$\frac{R\$615,45}{MWh}$$

Valor Total do Investimento

$$R\$4.268.500,68$$

Valor de Operação

$$\frac{R\$543,50}{MWh}$$

Valor Anual de Operação

$$R\$3.769.485,93$$

Valor de Interligação

$$\frac{R\$11,14}{MWh}$$

Valor Anual de Interligação

$$R\$77.262,32$$

Valor de Recebimento de Resíduos

$$\frac{R\$905}{MWh}$$

Valor Anual de Recebimento de Resíduos

$$R\$6.276.696,00$$

Preço de Venda da Energia Elétrica

$$\frac{R\$140}{MWh}$$

Valor Anual de Venda da Energia Elétrica

$$R\$970.980,74$$

$$VPL = R\$23.126.611,20$$

(b) Incineração

Cálculo de Produção Elétrica

$$0.5 \frac{MWh}{t\ RSU} \times 45.587 \frac{t\ RSU}{ano} = 22.794 \frac{MWh}{ano}$$

Cálculo da Potência

$$22.794 \frac{MWh}{ano} \times \frac{1}{7.800} \frac{ano}{hora} = 3MW$$

Os dados de viabilidade financeira foram adotados de INFUESTA (2015) – Estudo de Caso de Paranapanema

Investimento Inicial

$$\frac{R\$630.000}{\frac{t\ RSU}{dia}}$$

Investimento Inicial Total – 140 t/dia

$$R\$ 88.368.646,15$$

Custo de Operação

$$\frac{R\$36.500}{\frac{t\ RSU}{dia}}$$

Custo Anual de Operação -140 t/dia

$$R\$ 5.119.770,77$$

Preço de Venda da Energia Elétrica

$$\frac{R\$140}{MWh}$$

Valor Anual de Venda de Energia Elétrica – 22.794 MWh

$$R\$3.191.090,00$$

Valor Anual para Modelo Atual de Aterro Sanitário R\$80,00/ton RSU

$$R\$3.646.960,00$$

VPL = - R\$ 74.527.590,84

(c) Gaseificação

Mesmo a gravimetria da CEAGESP ser diferente do estado de SP, foi considerado a taxa de produção de CDR¹ em 0.5 t CDR/t RSU, valor recomendado pela Carbogás (2017).

$$140 \frac{t \text{ RSU}}{\text{dia}} \times 0,5 \frac{t \text{ CDR}}{t \text{ RSU}} = 70 \frac{t \text{ CDR}}{\text{dia}}$$

$$PCI \text{ (CDR)} = 4.200 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$4.200 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \times 70 \frac{\text{kg CDR}}{\text{dia}} \times \frac{1000}{24} = 12.250.000 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Conversão de 75% da Gaseificação:

$$12.250.000 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \times 0,75 = 9.187.500 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

$$PCI \text{ (Gás de Síntese)} = 1.160 \frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3}$$

Geração de Gás de Síntese

$$9.187.500 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \times \frac{1}{1.160} \frac{\text{Nm}^3}{\text{kcal}} = 7.920 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}$$

Calculo da Potência

$$\frac{7.920 \times 1.160 \times 0,28 \times 0,95}{860.000} = 3 \text{ MW}$$

Produção anual de energia elétrica

$$3 \times 7.800 \times 0,87 = 19.284 \text{ MWh}$$

Os dados de viabilidade financeira foram adotados de INFIESTA (2015) – Estudo de Caso de Paranapanema

Investimento Inicial

$$\frac{R\$167.777}{\text{MWh}}$$

Investimento total Inicial – 19.284MWh

R\$23.488.780

Custo de Operação

$\frac{R\$18.560,00}{MWh}$

Custo anual de Operação – 19.284MWh

R\$2.598.400,00

Preço de Venda da Eletricidade

$\frac{R\$215,00}{MWh}$

Valor Anual de venda da Eletricidade

R\$4.146.033,94

Valor Anual para Modelo Atual de Aterro Sanitário R\$80,00/ton RSU

R\$3.646.960,00

VPL = R\$ 18.354.629,80

(d) Tratamento Mecânico Biológico (TMB)

Cálculo do Potencial de metano

$$Lo = \frac{MCF \times DOC \times DOC_f \times F \times 16/12}{0,0007168} \text{ (IPCC,2006)}$$

Lo – Potencial de geração de metano do resíduo, $\frac{Nm^3}{t \text{ RSU}}$

MCF – Fator de Correção de Metano = 1,0

DOC – Fração de Carbono Orgânico Degradável no Lixo = 0,15

DOC_f – Fração do DOC que pode se decompor = 0,5

F – Porcentagem de CH_4 presente no biogás = 50%

$\frac{16}{12}$ – Conversão de Carbono para Metano

Para o cálculo do DOC , temos:

$$DOC = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,3 \times D) \text{ (IPCC,2006)}$$

A – Fração de papel e tecido no RSU

B – Fração de resíduos não orgânicos no RSU

C – Fração de alimentos no RSU

D – Fração de madeira no RSU

$$DOC = (0,4 \times 0) + (0,17 \times 0) + (0,15 \times 1) + (0,3 \times 0)$$

$$DOC = 0,15$$

Cálculo do Potencial de metano e Geração de metano

$$Lo = \frac{1,0 \times 0,15 \times 0,5 \times 0,5 \times 16/12}{0,0007168}$$

$$Lo = 69,75 \frac{Nm^3}{t \text{ RSU}}$$

Potencial de geração de Metano por dia

$$140 \frac{t}{dia} \cdot 69,75 \frac{Nm^3}{t}$$

$$6.653 Nm^3$$

Cálculo da Potência

$$Potência = \frac{Q \times PCI(biogás) \times \eta}{860.000}$$

$$Q - Vazão Biogás \left(\frac{m^3}{h} \right)$$

$$PCI(Biogás) = 5.500 \left(\frac{kcal}{Nm^3 CH_4} \right)$$

η – Eficiência do Motor (Ciclo Otto)

$$\frac{\frac{6.653}{24} \times 5,500 \times 0.28}{860.000}$$

$$0.5 \text{ MW}$$

Cálculo de Produção Elétrica

$$Energia = Tempo de Operação \times Potência \times Fator de Carga$$

$$Fator de Carga = 87\%$$

$$Tempo de Operação = 7800h$$

$$3.369 \text{ MWh}$$

Adotando os valores de viabilidade econômica de LEITE (2016)

Valor do Investimento

$$\frac{R\$140.000}{t \text{ RSU}/dia}$$

Valor Total do Investimento

R\$13.353.484,31

Valor de Operação

$$\frac{R\$25.000}{t \text{ RSU}/dia}$$

Valor Anual de Operação

R\$2.384.550,77

Preço de Venda da Energia Elétrica

$$\frac{R\$140}{MWh}$$

Valor Anual de Venda da Energia Elétrica

R\$471.619,22

Valor Anual para Modelo Atual de Aterro Sanitário R\$80,00/ton RSU

R\$3.646.960,00

VPL = R\$614.433,82