

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Modelagem matemática para a localização ótima de usinas de incineração com recuperação energética de resíduos sólidos domiciliares: uma aplicação para Região Metropolitana da Baixada Santista e Litoral Norte

Nádja Nara Lima Heiderich

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Economia Aplicada

**Piracicaba
2011**

Nádja Nara Lima Heiderich
Economista

Modelagem matemática para a localização ótima de usinas de incineração com recuperação energética de resíduos sólidos domiciliares: uma aplicação para Região Metropolitana da Baixada Santista e Litoral Norte

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ VICENTE CAIXETA FILHO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Economia Aplicada

**Piracicaba
2011**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Heiderich, Nádja Nara Lima

Modelagem matemática para a localização ótima de usinas de incineração com recuperação energética de resíduos sólidos domiciliares: uma aplicação para Região Metropolitana da Baixada Santista e Litoral Norte / Nádja Nara Lima Heiderich. - - Piracicaba, 2011.

121 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Aterros sanitários 2. Energia - Geração 3. Incineração de resíduos urbanos
4. Modelos matemáticos 5. Resíduos sólidos residenciais - Tratamento térmico
6. Usinas - Localização - São Paulo I. Título

CDD 338.4762844
H465m

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, pelo cuidado constante e pela força para enfrentar todas as barreiras para que este trabalho pudesse ser concretizado.

À minha família pelo apoio e por sempre depositarem confiança em mim.

Ao meu marido, Clovis, por todo carinho, amor, cuidado, paciência e, principalmente, por sempre estar ao meu lado me encorajando, não me deixando desistir nunca, por mais difícil que seja.

Agradeço, em especial, ao professor Caixeta pela excelente orientação, por toda a atenção concedida, pela confiança depositada, pela paciência em ensinar, pela boa vontade em ajudar. Aprendi muito com a sua dedicação e disciplina em todas as atividades que desempenha. Agradeço pela oportunidade no Esalq – Log, que me foi muito proveitosa não somente para a realização desta pesquisa, como também para o meu amadurecimento pessoal e profissional.

À equipe do Esalq – Log, sempre atenciosos, simpáticos e dispostos a ajudar.

À Daniela Bartholomeu pelas importantes contribuições a este trabalho, não apenas durante a supervisão das atividades executadas no projeto Inglaterra durante o período que estive no Esalq – Log, como também o suporte oferecido ao longo da realização do mesmo, a qualquer momento que eu precisasse.

À Valeriana Cunha pelas contribuições na etapa final desta pesquisa, principalmente, no que se refere à modelagem matemática desenvolvida no trabalho.

Ao professor Augusto Gameiro pelas sugestões na fase inicial do trabalho. À professora Márcia Azanha pelo interesse e dedicação. À equipe de professores da Esalq agradeço por todo aprendizado a mim fornecido.

Aos funcionários da Economia, em especial à Maielli e à Paula, pela dedicação e competência.

Agradeço ao Savastano (CETESB) e ao Ricardo Guedes (Secretaria de Saneamento e Energia) pelos esclarecimentos, tão importantes para a realização desta pesquisa.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	13
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 O problema e sua importância	15
1.2 Objetivos.....	16
1.3 Estrutura do trabalho	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Tratamento Térmico de Resíduos.....	19
2.2 Aterros Sanitários	25
2.3 Comparação entre incineração com recuperação energética e aterros sanitários	26
2.4 Panorama dos Resíduos Sólidos Domiciliares no Estado de São Paulo	28
2.4.1 Gerenciamento de Resíduos Sólidos Domiciliares.....	29
2.4.2 Situação das Regiões Metropolitanas do Estado de São Paulo em relação à disposição final de RSD	32
2.4.3 Ações direcionadas ao uso da tecnologia de incineração com recuperação de energia para tratamento de RSD no Estado de São Paulo.....	37
3 METODOLOGIA	43
3.1 Modelos matemáticos de localização	43
3.2 Aplicação empírica de modelos matemáticos de localização.....	49
3.3 Modelo Proposto	51
3.3.1 Especificação do Modelo.....	51
3.3.2 Representação Diagramática	52
3.3.3 Apresentação Matemática.....	52

3.4	Especificação dos dados.....	57
3.4.1	Delimitação da área de estudo	57
3.4.2	Geração de RSD.....	58
3.4.3	Custo de transporte.....	60
3.4.4	Municípios potenciais para a instalação da usina	61
3.4.5	Parâmetros técnicos da usina	62
3.4.6	Preço de venda da energia elétrica.....	63
3.4.7	Preço de venda dos créditos de carbono	64
3.4.8	Potenciais aterros para a recepção de escórias e cinzas	65
3.5	Cenários para a modelagem proposta	65
3.5.1	Cenário 1	65
3.5.2	Cenário 2.....	66
3.5.3	Cenário 3.....	66
3.5.4	Cenário 4.....	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
4.1	Cenário 1	73
4.2	Cenário 2.....	74
4.3	Cenário 3.....	79
4.4	Cenário 4.....	83
4.5	Consolidação dos resultados	87
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
	REFERÊNCIAS.....	93
	APÊNDICES.....	99
	ANEXOS	115

RESUMO

Modelagem matemática para a localização ótima de usinas de incineração com recuperação energética de resíduos sólidos domiciliares: uma aplicação para Região Metropolitana da Baixada Santista e Litoral Norte

A presente pesquisa teve por objetivo propor uma estrutura de modelagem matemática para a localização ótima de unidades de tratamento térmico de resíduos com recuperação energética. Para tal, o ferramental utilizado foi o método de programação inteira mista, sendo a modelagem desenvolvida aplicada para a Região Metropolitana da Baixada Santista e Litoral Norte. Foi considerada como premissa básica que o processo de incineração seria operado pelo poder público; todos os municípios geradores de Resíduos Sólidos Domiciliares foram considerados como potenciais localidades para a instalação da unidade de tratamento térmico de resíduos; todos os aterros sanitários que atendiam os Municípios estudados foram considerados para a recepção das escórias e cinzas provenientes do processo de incineração. Foram especificados quatro cenários para tal análise, que abordaram competitividade em relação ao uso de aterros sanitários e a presença de eficiência na coleta seletiva dos Municípios. Os resultados apontaram para que a unidade de tratamento térmico de resíduos se localize no entorno dos Municípios de Santos, Praia Grande e São Vicente. Mesmo com a opção do uso de aterros sanitários, a implantação da unidade de tratamento térmico de resíduos se apresentou como uma alternativa mais favorável, tendo sido levados em conta, na modelagem proposta, aspectos tanto ambientais como econômicos.

Palavras – chave: Resíduos sólidos domiciliares; Incineração; Aterros sanitários; Modelo matemático

ABSTRACT

Mathematical modeling for the optimal location for incineration plants with energy recovery from municipal solid waste: an application to the Santos Metropolitan Region and North Coast

This study aimed to propose a mathematical modeling framework for optimal location of units of the thermal treatment of waste with energy recovery. To this end, the tool used was the method of mixed integer programming, and the developed modeling applied to the Santos Metropolitan Region and North Coast. It was considered as the basic premise that the incineration process would be operated by the Government; all municipalities solid waste generators were considered as potential locations for the installation of the unit thermal treatment of waste, all landfills that serve municipalities studied were considered for receipt of slag and ash from the incineration process. Four scenarios were specified for this analysis that addressed competitiveness in relation to the use of landfills and the presence of selective collection efficiency in the municipalities. Results showed that the unit of thermal treatment of waste should be located in the vicinity of the cities of Santos, São Vicente and Praia Grande. Even with the option of using landfill, the deployment of the unit of thermal treatment of waste is presented as an alternative more favorable, having been taken into account in the proposed model, both environmental and economic aspects.

Keywords: Municipal solid waste; Incineration; Landfill; Mathematical model

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tocha de plasma.....	20
Figura 2 – Processo de plasma térmico da Westinghouse Plasma Corporation.....	20
Figura 3 – Produtos da conversão via plasma	21
Figura 4 – Estágios em uma rede de suprimentos	46
Figura 5 – Representação diagramática do modelo de localização ótima.....	52
Figura 6 – Municípios da Baixada Santista e Litoral Norte	58
Figura 7 – Fluxo de resíduos proveniente dos Municípios à usina de incineração para o Cenário 1	74
Figura 8 – Fluxo de resíduos proveniente dos Municípios à usina de incineração para o Cenário 3.....	81
Figura 9 – Fluxo de resíduos enviados diretamente aos aterros sanitários para o cenário 3	82
Figura 10 – Fluxo de resíduos proveniente dos Municípios à usina de incineração para o Cenário 4.....	85
Figura 11 – Fluxo de resíduos enviados diretamente aos aterros sanitários para o cenário 4	86
Figura 12 – Processo de incineração de resíduos com recuperação energética: entrega dos resíduos.....	101
Figura 13 – Processo de incineração de resíduos com recuperação energética: depósito de resíduos.....	102
Figura 14 – Processo de incineração de resíduos com recuperação energética: combustão e resfriamento.....	103
Figura 15 – Geração de energia elétrica através da geração de vapores de água.....	104
Figura 16 – Lavagem a seco dos gases.....	105
Figura 17 – Filtro de Mangas	105
Figura 18 – Armazenamento de cal e de combustíveis residuais	106
Figura 19 – Catalisador	106
Figura 20 – Monitoração de gases	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Plantas de incineração com recuperação energética na Europa, 2008.....	23
Tabela 2 – Estimativas de produção per capita de resíduos sólidos domiciliares, em função da população urbana.....	29
Tabela 3 – Evolução do Enquadramento do Índice de Qualidade de Resíduos - IQR no Estado de São Paulo, quanto aos Municípios, em percentual (%)	30
Tabela 4 – Distribuição do IQR médio (2008), por Municípios classificados por número de habitantes e correspondente quantidade de resíduo gerada	31
Tabela 5 – Distribuição do IQR médio (2009), por Municípios classificados por número de habitantes e correspondente quantidade de resíduo gerada	32
Tabela 6 – Fluxo de RSD da RM da Baixada Santista e Litoral Norte	33
Tabela 7 – Fluxo de RSD da RM de Campinas.....	35
Tabela 8 – Fluxo de RSD da RM de São Paulo.....	36
Tabela 9 – Dados básicos da Unidade de Tratamento Térmico de Resíduos.....	41
Tabela 10 – Abrangência da Coleta de RSD em Municípios da Baixada Santista e do Litoral Norte	59
Tabela 11 – Estimativa da quantidade de RSD gerada diariamente nos Municípios da Baixada Santista e do Litoral Norte	60
Tabela 12 – Custo de transporte por faixa de distância entre os Municípios da Baixada Santista e do Litoral Norte.....	61
Tabela 13 – Parâmetros técnicos da usina de incineração de RSD	62
Tabela 14 – Tarifa de distribuição de energia elétrica vigente em cada Município, R\$/kWh	63
Tabela 15 – Composição Gravimétrica do RSD no Município de Itanhaém, 2004	69
Tabela 16 – Composição Gravimétrica do RSD no Município de Peruíbe.....	70
Tabela 17 – Composição Gravimétrica do RSD no Município de Santos	70
Tabela 18 – Quantidade de RSD gerados, excluídos os materiais recicláveis	71
Tabela 19 – Municípios e quantidades (em toneladas) enviadas à usina de incineração localizada no Município de Santos, conforme Cenário 1	73

Tabela 20 – Municípios e quantidades (em toneladas) enviadas à usina de incineração localizada no Município de São Vicente, conforme <i>ranking</i> do Cenário 2	76
Tabela 21 – Municípios e quantidades (em toneladas) enviadas à usina de incineração localizada no Município de Praia Grande, conforme <i>ranking</i> do Cenário 2.....	76
Tabela 22 – Municípios e quantidades (em toneladas) enviadas à usina de incineração localizada no Município de Guarujá, conforme <i>ranking</i> do Cenário 2.....	77
Tabela 23 – Municípios e quantidades (em toneladas) enviadas à usina de incineração localizada no Município de Praia Grande, conforme Cenário 3	80
Tabela 24 – Fluxo de RSD diretamente dos Municípios aos aterros sanitários, conforme Cenário 3	82
Tabela 25 – Municípios e quantidades (em toneladas) enviadas à usina de incineração localizada no Município de São Vicente, conforme Cenário 4.....	84
Tabela 26 – Fluxo de RSD diretamente dos Municípios aos aterros sanitários, conforme cenário 4	86
Tabela 27 – Distâncias entre os Municípios gerador i de RSD e o potencial Município receptor j , em km.....	118
Tabela 28 – Distância entre o potencial Município receptor j e o aterro sanitário localizado no Município k , em km	119
Tabela 29 – Custo de Transporte entre o Município gerador i e o Município receptor j , em R\$/t de RSD	120
Tabela 30 – Custo de Transporte entre o potencial Município receptor j e o aterro sanitário localizado no Município k , em R\$/t de RSD	121

1 INTRODUÇÃO

1.1 O problema e sua importância

Na escolha de uma tecnologia para a disposição final de Resíduos Sólidos Domiciliares – RSD, os governos decidem não apenas o quanto é reduzido do resíduo final e seu custo ambiental, mas também a composição da produção de energia e o montante de produtos reciclados na economia (DYKGRAAF; VOLLEBERGH, 2004).

A União Européia e o Japão têm adotado uma hierarquia para o gerenciamento dos RSD, e, no que se refere à disposição final, primeiro, seria preferível a redução de geração de resíduos, depois a reciclagem, em seguida a incineração e, só em último caso, o envio a aterros sanitários (DYKGRAAF; VOLLEBERGH, 2005).

Os EUA não têm uma hierarquia bem definida, apesar de a Agência de Proteção Ambiental – EPA também seguir uma abordagem hierárquica na sua política de resíduos sólidos, com uma preferência por redução da fonte, seguido de reciclagem ou compostagem e, finalmente pela eliminação dos resíduos através da incineração ou aterros sanitários. Entretanto, não declaram uma preferência explícita por incineração, mas reconhecem que quando a geração de resíduos é inevitável, a recuperação de energia e materiais residuais dos mesmos, para fins benéficos, são preferíveis. Apesar disso, a disposição final de resíduos ainda é dominada por aterros sanitários (DYKGRAAF; VOLLEBERGH, 2004).

No Brasil, diversas iniciativas têm sido adotadas na tentativa de melhora das condições de disposição final de resíduos sólidos. Recentemente instituiu-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos, através da Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010, priorizando na gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos, a seguinte ordem: “não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento de resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada para os rejeitos” (BRASIL, 2010, p.6).

Ainda, conforme disposto na Lei 12.305/10, poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos Resíduos Sólidos Domiciliares, desde que, com a devida comprovação de viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.

A incineração de resíduos com recuperação energética vem sendo apontada como uma possível alternativa ao uso de aterros sanitários para regiões brasileiras onde tem se tornado inviável o uso desta tecnologia de disposição final. Isto tem ocorrido nas três Regiões Metropolitanas do Estado de São Paulo (Baixada Santista e Litoral Norte, São Paulo e Campinas), devido à escassez de áreas ambientalmente adequadas para a implantação de novos aterros e à exaustão dos já existentes.

Em face deste problema, as autoridades estaduais têm direcionado esforços para verificar a viabilidade de implantação de usinas de incineração com recuperação energética a partir de RSD nestas regiões.

A Secretaria de Meio Ambiente – SMA e a Secretaria de Saneamento e Energia – SSE, através da Resolução Conjunta nº 49, de 18 de outubro de 2007, criaram o Grupo de Trabalho para propor um programa estadual de aproveitamento energético de RSD e outros rejeitos da atividade econômica (SÃO PAULO, 2007).

Como das três Regiões Metropolitanas, a Baixada Santista e Litoral Norte é a que apresenta a situação mais crítica, onde quase todos os Municípios pertencentes à mesma enviam os seus resíduos a aterros localizados em Municípios a cerca de 100 km de distância, com vida útil próxima do fim, os estudos que verificam a viabilidade de implantação de usinas de incineração com recuperação energética a partir de RSD se direcionam, inicialmente, a esta região. Tais estudos são de caráter técnico, econômico e ambiental.

Sendo assim, um modelo que procurasse determinar a localização ótima da usina de incineração de resíduos nesta região seria, provavelmente, de grande utilidade no conjunto de estudos para implantação da mesma. Assim como para regiões que venham a demandar análises como as que têm sido realizadas na Baixada Santista e Litoral Norte.

1.2 Objetivos

O objetivo central do presente estudo é propor uma estrutura de modelagem matemática para a localização ótima de unidades de tratamento térmico de resíduos com recuperação energética, procurando servir como ferramental de apoio para a tomada de decisão dos agentes públicos quanto à localização destas unidades. Como objetivos secundários, pretende-se: 1)

apresentar e comparar as tecnologias de incineração com recuperação energética de resíduos e aterros sanitários; 2) analisar a fase crítica pela qual passam os Municípios do Estado de São Paulo, em especial os Municípios que fazem parte das Regiões Metropolitanas do Estado; 3) aplicar o modelo matemático de otimização proposto para a localização da usina de incineração na Baixada Santista e Litoral Norte, procurando maximizar lucro do processo de incineração de RSD.

1.3 Estrutura do trabalho

Este estudo é dividido em quatro capítulos, além desta introdução. No Capítulo 2 é realizada uma revisão de literatura sobre as técnicas de gerenciamento de RSD, bem como sobre a situação dos mesmos no Estado de São Paulo, mostrando a relevância do problema em análise. No capítulo 3 define-se a metodologia utilizada, através de um modelo de localização de programação inteira mista. No Capítulo 4 se encontram os resultados da utilização do modelo apresentado. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões decorrentes do desenvolvimento desta dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tratamento Térmico de Resíduos

A preocupação com a adequada destinação final de resíduos sólidos propiciou o desenvolvimento de novas tecnologias, muitas das quais direcionadas para o tratamento térmico destes resíduos de forma a gerar o mínimo de sobra final possível. Além disso, tem-se buscado, a partir do tratamento térmico, a geração de energia térmica ou elétrica, tanto para a auto-suficiência energética das próprias unidades de tratamentos térmico de resíduos, como para geração de receita ao se exportar energia para o entorno das mesmas. Dentre as tecnologias de tratamento térmico com recuperação energética encontram-se a gaseificação, o plasma¹ térmico e a incineração.

A gaseificação é o processo no qual a oxidação parcial de um combustível (carvão, petróleo, biomassa, resíduos ou outros materiais que contenham carbono) é capaz de gerar um gás que pode ser usado para a produção de energia e produtos químicos. Pela necessidade de pré-tratamento dos resíduos, onde são retirados os ferrosos, alumínio e vidros, o gás gerado neste processo é limpo, sem ser necessária a limpeza externa².

Já o plasma térmico é gerado pelo uso de eletricidade nas tochas de plasma (Figura 1). Dependendo das condições de geração, o plasma pode atingir elevadas temperaturas (5.000 °C a 50.000°C).

¹ O plasma é uma forma especial de matéria, cujo comportamento físico é diferente dos outros três estados tradicionalmente conhecidos: sólido, líquido e gasoso. Quando um material na forma sólida é aquecido, ocorre uma transição para o estado líquido a uma dada temperatura. Da mesma forma, se este líquido continuar a ser aquecido, ocorrerá formação da fase gasosa. Se este gás for ainda mais aquecido, ter-se-á então o estado plasma (VIMIEIRO, 2007).

² PAGLIUSO, J. D. **Tratamento térmico de resíduos: gaseificação ou combustão?** 1º Simpósio de Resíduos Sólidos. São Carlos, 2009.



Figura 1 - Tocha de plasma

Fonte: Facilitation Center For Industrial Plasma Tecnologies, citado por Vimieiro (2007)

Durante o processo de geração do plasma ocorre a gaseificação do material orgânico pela reação do carbono com o oxigênio adicionado ao processo ou com água contida nos resíduos (ou adicionada ao processo). Para que esta reação seja eficiente torna-se necessária a adição de energia, neste caso, proveniente das tochas de plasma, conforme pode ser visualizado na Figura 2 (VIMIEIRO, 2007).

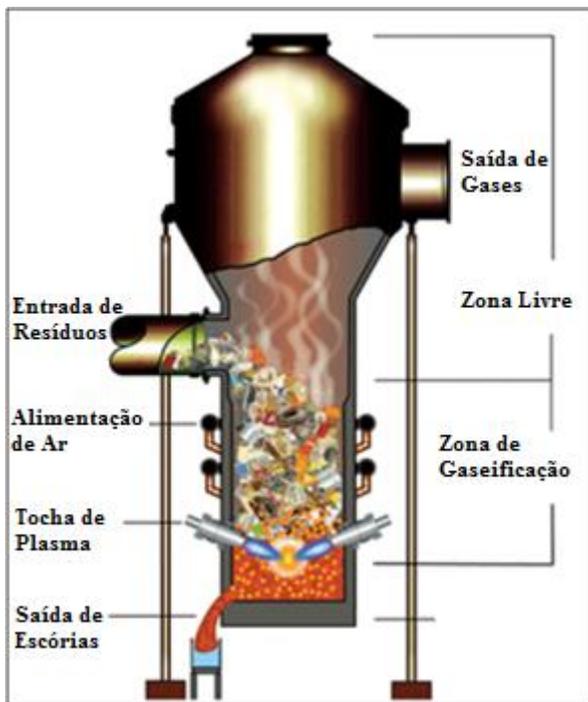


Figura 2 – Processo de plasma térmico da Westinghouse Plasma Corporation

Fonte: Bhasin (2009)

De acordo com Vimieiro (2007), esta reação entre a parte orgânica dos resíduos e o oxigênio adicionado produzirá um gás que pode ser utilizado para a geração de energia. Já a parte inorgânica se transformará em um material liquefeito devido às altas temperaturas provenientes das tochas de plasma. Este material, quando retirado do reator, se apresentará como um subproduto inerte e vitrificado, podendo posteriormente ser utilizado para diversos fins (Figura 3).



Figura 3 - Produtos da conversão via plasma

Fonte: Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto, citado por VIMIEIRO (2007)

A incineração³ é a tecnologia de tratamento térmico de resíduos com recuperação energética mais conhecida e consiste na combustão de resíduos a altas temperaturas (geralmente de 800°C a 1.200°C), em mistura com uma quantidade adequada de ar e durante certo tempo, formando cinzas e gases (VIMIEIRO, 2007).

O processo de incineração de resíduos é entendido como sendo a combustão controlada de resíduos sólidos através de modernos fornos, que atualmente são equipados com controles de poluição. É um método eficiente na conversão de resíduos em energia, ao passo que reduz o volume de resíduos a ser disposto em aterros sanitários. Quando é tecnologicamente e economicamente factível, pode prover ganhos em eficiência energética, associados às reduções

³ O processo desta tecnologia está melhor explicado no Apêndice A, devido à sua importância para os objetivos desta pesquisa.

relativas a gases do efeito estufa, usando a energia gerada para a eletricidade e calor, reduzindo o uso de combustíveis fósseis (INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION, 2009).

Segundo Pagliuso⁴, a incineração pode ser usada para o tratamento de resíduos industriais perigosos e resíduos de serviços de saúde, que se apresentem em volumes relativamente pequenos, porém de alta periculosidade. É uma tecnologia eficaz para a redução do volume e periculosidade do resíduo, com baixo consumo de energia, já que qualquer patogênico apresentado no fluxo de resíduos original será destruído no processo de incineração.

O uso da incineração de resíduos é uma prática secular para sua destinação final (o primeiro incinerador foi construído por volta de 1870). Porém, durante a década de 80, com o advento do controle de emissões, esse método sofreu forte pressão nos EUA, em países da União Européia e Japão, onde muitas usinas viram-se obrigadas a encerrar suas atividades por não conseguirem atender às novas normas ambientais ou arcar com os pesados investimentos para se adequar aos sistemas de tratamento de gases e vapores de incineração (USINA VERDE, 2009a).

Para se ter uma idéia, em 1980, nos Estados Unidos, as usinas de incineração eram listadas pela *US Environment Protection Agency - EPA* como as maiores fontes de emissão de mercúrio e furanos/dióxidos. Em resposta às fortes regulações, a indústria de incineração investiu mais de US\$ 1 bilhão em sistemas de controle de poluição se tornando um dos menores poluidores em processos de alta temperatura (THEMELIS, 2003).

Na Alemanha, as emissões de contaminantes tóxicos por meio da incineração de resíduos reduziram drasticamente. Em 1990, as usinas de incineração eram responsáveis por 400gTU⁵, representando um terço de todas as emissões de dióxido no país, que totalizavam 1.200gTU. Já nos anos 2000, o total de emissões de dióxido no país era menor que 70gTU, sendo que destes, apenas 0,5gTU eram representados por usinas de incineração, ou seja, menos de 1% do total (ALEMANHA, 2005).

⁴ PAGLIUSO, J. D. **Tratamento térmico de resíduos: gaseificação ou combustão?** 1º Simpósio de Resíduos Sólidos. São Carlos, 2009.

⁵ Gramas por Unidades de Toxidade

Atendidas as exigências de caráter ambiental, as usinas de incineração com recuperação energética são consideradas como uma tecnologia adequada, de acordo com a Convenção de Estocolmo.

A partir de dados divulgados pela CEWEP (2010) para o ano de 2008, na Europa, foram tratados aproximadamente 53 milhões de toneladas de resíduos nas 339 usinas de incineração com recuperação energética espalhadas pelo continente, gerando cerca de 21 milhões de MWh. A distribuição destas plantas pode ser observada a partir da Tabela 1.

No ano de 2008, a Alemanha liderou a quantidade de resíduos incinerados (quase 19 milhões de toneladas), produzindo mais de 7 milhões de MWh⁶. Entretanto, não se espera a instalação de plantas adicionais neste país.

Tabela 1 – Plantas de incineração com recuperação energética na Europa, 2008

	Nº de plantas	Resíduos tratados (milhões de toneladas/ano)	Eletricidade produzida (milhões de MWh/ano)	Nº de plantas adicionais até 2020
França	129	13,5	3,489	7
Portugal	3	0,96	0,565	0
Bélgica	16	2,66	1,31	6
Holanda	11	6	2,91	1
Suíça	29	3,6	1,833	0
Alemanha	68	18,7	7,35	0
Rep. Tcheca	3	0,38	0,0195	5
Hungria	1	0,401	0,17	1
Dinamarca	29	3,59	1,866	1
Noruega	19	0,836	0,105	4
Suécia	29	2,29	1,53	1
Finlândia	2	0,179	0,017	5
Total	339	53,1	21,17	31

Fonte: CEWEP (2010).

⁶ O que equivaleria ao abastecimento de 4.166.666 residências, se considerado o consumo médio mensal de 140 kWh.

A França aparece como sendo o segundo país com a maior quantidade de resíduos incinerada, atingindo 13 milhões de toneladas em 2008, gerando cerca de 3,5 milhões de MWh. Foi também o país com o maior número de plantas instaladas e de plantas previstas para instalação até 2020.

Ao todo estima-se que, em 2010, cerca de 21 milhões de MWh tenham sido gerados pelas usinas de incineração em toda a Europa, sendo prevista a instalação de mais 31 usinas de incineração com recuperação energética até 2020.

O Japão adotou a incineração para tratamento de maior parte dos resíduos onde não há possibilidade de se minimizar desde a geração; outras cidades desenvolvidas, em outros países, caminham para adotar a mesma solução. Na China, devido à sua grande dependência de carvão como insumo para a geração de eletricidade, o uso de tratamento térmico de resíduos para geração de energia pode reduzir consideravelmente suas emissões de óxido de nitrogênio e óxido de enxofre (MENDES; IMURA, 2004).

Entre 1996 e 2001, 117 novas plantas de incineração de resíduos urbanos com recuperação de energia foram construídas, com destaque para países em desenvolvimento da Ásia (Coréia do Sul, China, Taiwan, Malásia e Singapura), ampliando em 7,8 milhões de toneladas a capacidade anual de tratamento de resíduos (USINA VERDE, 2009a).

No Brasil, o primeiro incinerador foi instalado, em 1896, em Manaus, para processar 60 t/dia de RSD, tendo sido desativado, em 1958, por problemas de manutenção (MENEZES, 2000 apud HENRIQUES, 2004).

Ao longo do século XX, outros incineradores foram instalados, só que no Município de São Paulo. Em 1913, no bairro do Araçá, foi instalado um incinerador com capacidade para 40 t/dia, sendo desativado na década de 40. Em 1949, foi instalado outro incinerador, no bairro de Pinheiros, com capacidade para 200 t/dia, sendo desativado em 1990. Em 1959, foi instalado um incinerador na Avenida do Estado e, em 1968, no bairro Vergueiro, ambos com capacidade para 300 t/dia, estando desativados em 1993. Todas essas instalações contavam com tecnologia para incineração de RSD já ultrapassada, de forma que não poderiam atender às exigências ambientais contemporâneas (HENRIQUES, 2004).

Desde então, a incineração de resíduos no Brasil está voltada, especialmente, ao tratamento de resíduos perigosos, sendo iniciada, a partir da década de 70, uma fase de

implantação de incineradores para o tratamento de resíduos especiais, como: aeroportuários, hospitalares, industriais e outros resíduos perigosos. Estes incineradores se encontram espalhados pelo país, sendo caracterizados pelo porte muito pequeno e por equipamentos muito simples, com capacidades inferiores a 100 kg/hora (HENRIQUES, 2004).

2.2 Aterros Sanitários

Os aterros sanitários são definidos basicamente pela utilização de técnicas de controle da putrefação da matéria em vala aberta. Há uma intercalação entre camadas de resíduos sólidos e camadas de cinzas e materiais de varreduras das ruas, os quais são ainda cobertos por uma camada de terra. Devido ao baixo custo e tecnologia simples, os aterros sanitários podem ser facilmente operados pelas prefeituras. Porém, podem ocorrer problemas de contaminação dos lençóis freáticos e águas próximas, explosões do gás metano e incêndios incontroláveis, caso não sejam adequadamente implantados e operados (SÃO PAULO, 1992).

São poucos os lugares que operam aterros sanitários de maneira adequada. No Brasil, ainda existem muitos lixões, locais onde a disposição do lixo ocorre na superfície do solo, sem nenhum critério para a escolha de áreas e operação dos mesmos, acarretando problemas como contaminação do solo e águas subterrâneas, sem contar a ausência de controle ao acesso a lugares deste tipo, onde a presença de pessoas e animais é frequente. A falta de fiscalização torna propício o despejo de resíduos perigosos, como os de serviços de saúde e industriais (LINO; PERINOTO, 2008).

Com a intenção de reduzir as emissões provocadas pelos aterros existem projetos de captura do biogás (ou GDL) para a produção de energia ou combustível doméstico. Esse é um gás composto de metano, dióxido de carbono e nitrogênio. Desta forma, o uso deste método tem como principal consequência a redução da geração dos gases de efeito estufa. Além disso, com a receita gerada pela venda do biogás é possível reduzir o custo do descarte do lixo (FURLAN, 2007).

2.3 Comparação entre incineração com recuperação energética e aterros sanitários

Vários estudos, em diversos países, tentam apontar qual a melhor das tecnologias utilizadas para a disposição final de resíduos, principalmente, comparações relacionadas a aterros sanitários e incineração com recuperação de energia.

Brisson e Powell (1993) reportaram estimativas de custos externos para os aterros sanitários entre £1 e £4 por tonelada de resíduos; já para a incineração com recuperação energética estimaram benefícios externos entre £2 e £4 por tonelada de resíduos. Entretanto, quando os custos financeiros foram levados em conta, apenas no cenário onde se espera que os custos futuros dos aterros sanitários aumentem, devido à escassez de terras disponíveis, e os custos de incineração permaneçam constantes, é que o uso de incineração se torna vantajoso.

Vollegergh (1997) apud Dijkgraaf e Vollebergh (2005) calculou o custo social de uma usina de incineração geradora de energia, na Holanda. Tendo distinguido os custos privados e custos ambientais desta tecnologia, foi observado que ambos os custos são mais baixos para a destinação de resíduos em aterros sanitários e mais altos para destinação de energia através do uso da incineração de resíduos.

Dijkgraaf e Vollebergh (2004) apud Dijkgraaf e Vollebergh (2005), usando também dados da Holanda, constataram a superioridade da incineração em relação aos aterros sanitários, se considerados apenas os custos ambientais líquidos. Entretanto, considerando o custo social líquido, o método da disposição em aterros foi mais competitivo.

Apesar dos custos privados das usinas de incineração com recuperação de energia serem altos se comparados aos dos aterros sanitários, estes podem ser reduzidos quando há aumento da produção, aproveitando-se das economias de escala geradas (JAMASB; KIAMIL; NEPAL, 2008).

Na China, comparando emissões de gases do efeito estufa e uso de energia proveniente de resíduos entre o sistema de captura de gás de aterro e o sistema de incineração⁷, Han et al. (2010) mostram que sistemas de incineração apresentam maior redução na emissão de gases do efeito

⁷ Metodologias ACM0001 e AM0025 para a certificação de créditos de carbono, no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

estufa que um sistema de captura de gás de aterro. Mostram também que a geração de energia elétrica é muito maior se for usado o sistema de incineração, para a mesma quantidade de resíduos sólidos municipais.

Segundo a *International Solid Waste Association* (2009), as emissões de metano a partir de aterros sanitários são a maior fonte de gases do efeito estufa pelas atividades oriundas do setor de resíduos sólidos. Alguns países exigem que os aterros sejam equipados com sistemas de tratamento de gases e chorume. Tais processos permitem que as emissões de metano possam ser reduzidas através da captura e queima do biogás para geração de energia, com 35% de eficiência da energia do conteúdo do biogás. Entretanto, se comparado a processos de transformação da energia de resíduos a partir de incineradores, as taxas de recuperação de energia a partir de aterro são relativamente baixas.

Além disso, a tecnologia de incineração é capaz de reduzir o volume de resíduos em 90% do seu volume original, otimizando desta forma a capacidade dos aterros sanitários (MIRANDA; HALE, 1997). A sobra da incineração de resíduos é basicamente a escória, as cinzas e efluentes líquidos provenientes da lavagem dos gases. As cinzas do fundo podem ser depositadas em aterro comum, pois é material essencialmente inerte. As cinzas aéreas apresentam certo grau de periculosidade pela alta concentração de metais e carbono ativado contaminado com metais ou matéria orgânica, sendo necessário seu depósito em aterros de resíduos perigosos (HENRIQUES, 2004).

Entretanto, Miranda e Hale (1997) ressaltam que as tecnologias de incineração com recuperação de energia são alternativas competitivas apenas se as condições ambientais e econômicas desencorajam o uso de aterros sanitários. Em geral, segundo os autores, as plantas de incineradores com recuperação energética devem representar uma alternativa razoável se a maioria das condições a seguir for satisfeita:

- Altos custos privados de produção do aterro. Normalmente ocorre quando a terra é cara e/ou a região é densamente habitada.
- Altos custos externos do aterro sanitário. Isso pode ocorrer onde os lençóis freáticos são altos e/ou os operadores do aterro não estiverem recuperando a energia disponível a partir das emissões de metano.

- Altos custos da produção de combustível fóssil e de externalidades. Tipicamente ocorre quando velhas fábricas estão queimando combustíveis poluentes, como o carvão.
- Baixos custos privados de produção de uma Unidade de Recuperação Energética - URE. Normalmente observados quando o estado-da-arte das instalações é suficientemente avançado para se fazer uso de vantagens de economias de escala.
- Os processos de produção da URE são aptos para maximizar a eficiência energética. Ocorre quando é possível comercializar tanto a água quente com vapor, adicionalmente à energia elétrica e quando uma pré-seleção acarreta o aumento do valor calorífico dos resíduos.
- Baixos custos externos de uma URE. Isto normalmente ocorre quando há o reuso das cinzas, onde a tecnologia de controle de poluentes foi instalada e onde a pré-seleção de resíduos reduz o potencial de poluição pela liberação de gases tóxicos.

Levando-se em conta tais aspectos, as comunidades devem avaliar o processo de incineração com recuperação energética dentro do contexto dos interesses locais, do contexto econômico e do contexto ambiental. Desta forma, as metas e objetivos referentes ao gerenciamento de resíduos sólidos, impactos ambientais, padrões de produção e consumo e a composição de produção energética afetarão a adequação desta tecnologia (MIRANDA; HALE, 1997).

2.4 Panorama dos Resíduos Sólidos Domiciliares no Estado de São Paulo

Nas próximas seções estão reunidas as informações relacionadas aos resíduos sólidos no Estado de São Paulo, providas por órgãos que acompanham esta questão, bem como a problemática em torno da disposição final de resíduos nas regiões metropolitanas do estado, fundamentando a relevância do problema de interesse neste estudo.

2.4.1 Gerenciamento de Resíduos Sólidos Domiciliares

Anualmente, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB publica o Inventário de Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares, que procura organizar e sistematizar as informações sobre as condições ambientais e sanitárias dos locais de destinação final dos RSD nos Municípios Paulistas.

Para estimar a geração de resíduos domiciliares em todos os 645 Municípios do Estado de São Paulo, para 2008, a CETESB adotou os índices da Tabela 2. Entretanto, segundo a mesma, poderão ocorrer índices diferentes em alguns Municípios, devido a alguns fatores, como: atividade produtiva predominante, nível sócioeconômico, sazonalidade da ocupação, existência de coleta seletiva e ações governamentais de incentivo à redução da geração de resíduos domiciliares (SÃO PAULO, 2009).

Tabela 2 - Estimativas de produção per capita de resíduos sólidos domiciliares, em função da população urbana

POPULAÇÃO (hab.)	PRODUÇÃO (kg/hab.dia)
Até 100.000	0,4
De 100.001 a 200.000	0,5
De 200.001 a 500.000	0,6
Maior que 500.000	0,7

Fonte: São Paulo (2009).

Desta forma, a produção de resíduos variaria de 0,4 kg/hab, para Municípios com população de até 100.000 habitantes, chegando a 0,7 kg/hab em Municípios com população superior a 500.000 habitantes. Para o Município de São Paulo, em particular, são adotados os volumes diários de resíduos divulgados oficialmente pelas concessionárias às agências ambientais da CETESB.

De acordo com esta estimativa da CETESB, para 2008, em todo o estado seriam gerados cerca de 10 milhões de t/ano de resíduos (SÃO PAULO, 2009).

A quantidade de RSD coletada diariamente no Estado de São Paulo foi estimada pela ABRELPE (2008) em 47.777 toneladas, o que representa em torno de 96% do total de resíduos gerados diariamente.

Entretanto, a disposição final adequada de resíduos domiciliares ainda é um problema. Os resultados do Inventário da CETESB, publicado em 2009, demonstram que houve uma melhora sistemática na disposição dos resíduos ao longo do tempo, mas ainda foram identificados Municípios em situação inadequada (Tabela 3). A quantidade de RSD disposta adequadamente passou de 4,2% do total gerado, em 1997, para 51,8%, em 2008. Por outro lado, a disposição inadequada caiu de 77,8%, em 1997, para 8,2%, em 2008.

Tabela 3 - Evolução do Enquadramento do Índice de Qualidade de Resíduos - IQR⁸ no Estado de São Paulo, quanto aos Municípios, em percentual (%)

Situação	1997	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
I	77,8	36,4	29,6	27,8	29,6	23,6	22,2	21,2	8,2
C	18	24,3	24,3	30,3	31,2	27,9	30	31,2	40
A	4,2	39,3	46,1	41,9	39,2	48,5	47,8	47,6	51,8

Legenda: I = Inadequado, C = Controlado, A = Adequado

Fonte: São Paulo (2009).

Os Municípios de menor porte carecem de atuação mais intensa quanto às políticas públicas e quanto à capacitação dos agentes para a gestão adequada na disposição final de resíduos (SÃO PAULO, 2009). De acordo com a Tabela 4, o Índice de Qualidade de Resíduos - IQR médio dos Municípios com menos de 100.000 habitantes era de 7,9. Isso corresponde à classificação de aterro controlado, que são aqueles aterros onde as condições de disposição final de resíduos não é considerada adequada.

⁸ O Índice de Qualidade de Aterro de Resíduos – IQR varia de 0,0 a 10,0, e possui as seguintes faixas de enquadramento: Inadequada (I: de 0,0 a 6,0), Controlada (C: de 6,1 a 8,0) e Adequada (A: de 8,1 a 10). Este índice é apurado através das informações coletadas nas inspeções a cada estação de tratamento e/ou disposição, processadas através de questionário padronizado.

Essa técnica de disposição final se diferencia do lixão apenas pelo recobrimento dos resíduos com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada, minimizando os impactos ambientais, segundo a NBR 8.849/1985.

Tabela 4 - Distribuição do IQR médio (2008), por Municípios classificados por número de habitantes e correspondente quantidade de resíduo gerada

População do Município (habitantes)	IQR (Média 2008)	Municípios	Resíduos gerados (t/dia)	% de resíduos
Até 100.000	7,9	575	3.730	12,5
De 100.001 a 200.000	8,4	33	2.202	8,0
De 200.001 a 500.000	8,4	28	4.864	17,6
Maior que 500.000	8,9	9	16.832	60,9
Total	-	645	27.629	100,0

Fonte: São Paulo (2009).

Somente nove Municípios do Estado de São Paulo (com mais de 500 mil habitantes) sendo responsáveis por quase 61% dos resíduos gerados, apresentavam em média maior IQR que todos os demais Municípios. Sendo assim, os Municípios de pequeno porte demandam atenção especial dos órgãos públicos no que tange a políticas para a melhora das condições de disposição.

Pelo esforço conjunto da CETESB e prefeituras, este quadro pôde ser atenuado no ano de 2009, conforme ilustra a Tabela 5, que mostra a distribuição do IQR médio dos Municípios no inventário realizado naquele ano. Municípios de menor porte conseguiram alcançar um IQR médio próximo dos Municípios de grande porte (com mais de 500 mil habitantes): 8,4 contra 8,6.

Tabela 5 - Distribuição do IQR médio (2009), por Municípios classificados por número de habitantes e correspondente quantidade de resíduo gerada

População do Município (habitantes)	IQR (Média 2009)	Municípios	Resíduos gerados (t/dia)	% de resíduos
Até 100.000	8,4	574	3.727	14
De 100.001 a 200.000	8,9	34	2.280	9
De 200.001 a 500.000	8,7	28	4.922	19
Maior que 500.000	8,6	9	15.377	58
Total	-	645	26.306	100,0

Fonte: São Paulo (2010a).

Os Municípios de médio porte (da faixa de 100 a 200 mil habitantes) conseguiram melhorar as condições de disposição final dos resíduos sólidos produzidos, de maneira a obter o IQR médio superior aos Municípios de grande porte (em média, 0,3 ponto). Em relação ao ano anterior obtiveram aumento de 0,5 ponto em sua própria nota.

Os Municípios de médio porte, mas da faixa de 200 a 500 mil habitantes, obtiveram um IQR médio de 8,7, superior em 0,1 ponto em relação aos de grande porte e em 0,3 em relação à sua própria nota do ano anterior.

Os Municípios de grande porte (com mais de 500 mil habitantes), por sua vez, apresentaram redução no IQR médio de um ano para o outro, passando de 8,9 para 8,6.

2.4.2 Situação das Regiões Metropolitanas do Estado de São Paulo em relação à disposição final de RSD

A disposição final de RSD nas Regiões Metropolitanas – RM do Estado de São Paulo atravessa uma fase crítica. Em sua totalidade, os resíduos são dispostos em aterros, na maioria, aterros particulares, muitos dos quais com vida útil perto do fim.

Por conta do Projeto Ambiental Lixo Mínimo, instituído em 2007, pelas Resoluções SMA 21 e SMA 50, que veio para reforçar o esforço dispendido pela CETESB em abolir os lixões a

céu aberto, muitos Municípios que não tinham condições de adequar os aterros já existentes em seus próprios territórios ou sem possibilidade de implantar novos aterros, seja por questão de tempo hábil, disponibilidade de recursos ou mesmo de não conseguir o licenciamento ambiental de uma nova área, tiveram que buscar outros meios para disposição final dos resíduos. Nestes casos, a solução encontrada pela maioria foi enviar seus resíduos para outros Municípios que possuem aterros sanitários operando de forma adequada; padrão que pode ser verificado através do Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares, nas publicações entre 2008 e 2010.

Boa parte dos Municípios da Baixada Santista e Litoral Norte tem que subir os seus resíduos pela Serra do Mar para dispô-los em aterros localizados nas cidades de Mauá, Santa Isabel e Tremembé, estando distantes destes Municípios cerca de 100 km (Tabela 6).

Tabela 6 – Fluxo de RSD da RM da Baixada Santista e Litoral Norte

(continua)

Município Gerador	Qtde (t/dia)	Município de Disposição	Aterro	IQR	Vida Útil (anos)*
Itanhaém	65				
Praia Grande	345,6	Mauá	Particular	A	9 a 11
São Vicente	463				
Peruíbe	22,6	Peruíbe	Público	I	... ⁹
Caraguatatuba	96,15	Santa Isabel	Particular	C	...
Bertioga	76,90				
Cubatão	92,30				
Guarujá	184,8	Santos	Particular	A	11
Mongaguá	69,2				
Santos	577				

⁹ Dado numérico não disponível.

Tabela 6 – Fluxo de RSD da RM da Baixada Santista e Litoral Norte

(conclusão)

Município Gerador	Qtde (t/dia)	Município de Disposição	Aterro	IQR	Vida Útil (anos)*
Ilhabela	41,27				
São Sebastião	29,2	Tremembé	Particular	A	...
Ubatuba	80				

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da CETESB (2010), ESALQ-LOG e pesquisa de campo realizada com as Prefeituras dos Municípios.

Conforme mostrado na Tabela 6, estima-se que em torno de 10 anos alguns destes aterros não tenham mais condições de continuar em operação (tais aterros atendem juntos cerca de 90% do total de resíduos provenientes desta RM).

No Município de Peruíbe, as condições de disposição final de RSD são ainda piores que nos outros Municípios, pois os RSD permanecem sendo dispostos de maneira inadequada, conforme nota do IQR do Inventário Estadual de RSD, conceito I, apurado pela CETESB.

De acordo com a Tabela 7, os Municípios da Região Metropolitana de Campinas – RMC também observam uma situação bem delicada. A maior parte dos Municípios está sendo atendida por aterros quase esgotados, com vida útil inferior a cinco anos. No Município de Campinas, que gera aproximadamente 733 t/dia de RSD, o aterro público que recebe estes resíduos tem vida útil estimada de apenas um ano.

O aterro particular localizado no Município de Paulínia tem recebido resíduos de 13 Municípios dos 19 Municípios desta Região Metropolitana. Ao total, este aterro recebe resíduos de 31 Municípios de todo o Estado. Sua vida útil também está perto do fim, contando com apenas mais 4 anos de operação.

Alguns Municípios desta RM formalizaram o Consórcio Intermunicipal de Resíduos da RMC, são eles os Municípios de Monte Mor, Hortolândia, Sumaré, Nova Odessa, Americana e Santa Barbara d'Oeste. O objetivo deste consórcio é justamente tentar resolver conjuntamente o problema dos resíduos sólidos e até verificar a possibilidade de se implantar uma Usina de Tratamento de Resíduos¹⁰.

¹⁰ Fonte: Grupo Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial – ESALQ-LOG

Tabela 7 – Fluxo de RSD da RM de Campinas

Município Gerador	Qtde (t/dia)	Município de Disposição	Aterro	IQR	Vida Útil (anos)*
Campinas	732,8	Campinas	Público	A	1
Holambra	2,2	Holambra	Público	C	...
Indaiatuba	90,5	Indaiatuba	Público	A	...
Monte Mor	17,1				
Americana	122,8	Paulínia	Particular	A	4
Artur Nogueira	16				
Cosmópolis	22,8				
Engenheiro Coelho	4				
Hortolândia	123,5				
Itatiba	32,2				
Jaguariúna	14,3				
Nova Odessa	19,1				
Santo Antônio da Posse	6,9				
Sumaré	142,6				
Valinhos	50,8				
Vinhedo	24,9				
Paulínia	33,5				
Pedreira	15,8				
Santa Bárbara do Oeste	93,6	Santa Bárbara do Oeste	Público	A	3

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da CETESB (2010) e ESALQ-LOG.

A RM de São Paulo se encontra em situação um pouco melhor, já que o aterro que recebe um dos maiores fluxos de resíduos desta RM, e até de todo o estado, apresenta uma folga com relação à duração do aterro com uma vida útil de quase 30 anos (Tabela 8).

Tabela 8 – Fluxo de RSD da RM de São Paulo

(continua)

Município Gerador	Qtde (t/dia)	Município de Disposição	Aterro	IQR	Vida Útil (anos)*
Caieiras	33,9				
Cajamar	24,1				
Carapicuíba	235,6				
Embu-Guaçu	24,4				
Franco da Rocha	61				
Itapecerica da Serra	80,1	Caieiras	Particular	A	29
Juquitiba	7,7				
Maioporã	25,3				
São Lourenço da Serra	6,5				
São Paulo	5000				
Taboão da Serra	136,4				
Embu	149,2	Embu	Público	C	...
Guarulhos	890	Guarulhos	Particular	A	9
Cotia	91				
Itapevi	123,5	Itapevi	Particular	A	...
Jandira	56,1				
Vargem Grande Paulista	17,9				
Arujá	31				
Biritiba Mirim	10				
Ferraz de Vasconcelos	88,9				
Itaquaquecetuba	215,6	Itaquaquecetuba	Particular	C	17
Mogi das Cruzes	206				
Poá	55,6				
Salesópolis	3,9				
Suzano	165,2				
Diadema	238,6				
Mauá	250,5				
Ribeirão Pires	56	Mauá	Particular	A	9 a 11
Rio Grande da Serra	16,6				
São Bernardo do Campo	557,8				
São Caetano do Sul	76				

Tabela 8 – Fluxo de RSD da RM de São Paulo

(conclusão)

Município Gerador	Qtde (t/dia)	Município de Disposição	Aterro	IQR	Vida Útil (anos)*
Osasco	503,1	Osasco	Público	C	...
Francisco Morato	78,6	Santa Isabel	Particular	C	...
Guararema	8,7				
Santa Isabel	14,2				
Barueri	162,1	Santana de Parnaíba	Particular	A	...
Pirapora do Bom	6,3				
Jesus					
Santana de Parnaíba	57,2	Santana de Parnaíba	Público	C	...
Santo André	471,4	Santo André	Público	C	...
São Paulo	6000	São Paulo	Particular	A	...

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da CETESB (2010) e ESALQ-LOG.

O Município de São Paulo apresenta uma característica peculiar devido à grande quantidade de resíduos produzida diariamente (cerca de 11.000 t), necessitando enviar tais resíduos para dois aterros diferentes: um localizado no próprio Município e o outro localizado no Município de Caieiras.

2.4.3 Ações direcionadas ao uso da tecnologia de incineração com recuperação de energia para tratamento de RSD no Estado de São Paulo

Segundo Savastano¹¹, nas regiões metropolitanas não existem mais áreas para a implantação de novos aterros, diferentemente das demais regiões do Estado. Na Baixada Santista

¹¹ SAVASTANO, A. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.

e Litoral Norte, por exemplo, a vida útil dos aterros existentes está acabando e não existem outras áreas para novos aterros (informação verbal).

De acordo com Savastano, em algumas regiões do Estado de São Paulo, a única alternativa viável para a destinação de resíduos sólidos passa pelo processo de incineração. Em outras regiões isso não se aplica devido à condição ainda precária de disposição final de RSD.

Devido a esse panorama, diversas ações têm sido realizadas, com foco na solução do problema de destinação final dos RSD nas Regiões Metropolitanas, envolvendo tanto órgãos públicos da esfera estadual como municipal.

Desde 2004, o governo do Estado de São Paulo e o governo do Estado da Baviera, Alemanha, mantêm um acordo de cooperação técnica, com o objetivo principal de avaliar alternativas para o gerenciamento de resíduos sólidos municipais, principalmente de Regiões Metropolitanas (MARTIN, 2007).

Em sua primeira fase, o projeto de cooperação técnica promoveu a troca de informações entre os técnicos brasileiros e alemães, sobre as várias ferramentas que compõem o gerenciamento de resíduos naquele país (MARTIN, 2007).

Para isso, além da vinda de especialistas alemães para prestar consultoria ao projeto, e das inúmeras visitas dos técnicos especialistas da área ambiental de São Paulo aos órgãos de controle ambiental da Baviera e unidades de incineração instaladas e em funcionamento (SERENZA, 2004), segundo Savastano¹², foram realizados seminários com a participação de técnicos da Alemanha, México, Japão e EUA, para a discussão da tecnologia de incineração de resíduos com recuperação de energia (informação pessoal).

Ainda de acordo com Savastano¹³, como frutos desta primeira fase do projeto de cooperação, foram produzidos e publicados estudos e relatórios sobre a questão de gerenciamento de resíduos, além da publicação da Resolução SMA 79, de 04 de novembro de 2009, que estabelece as condições e diretrizes para a operação e o licenciamento da atividade de tratamento

¹² SAVASTANO, A. Mensagem recebida por nadja@usp.br em 02 agosto 2010.

¹³ SAVASTANO, A. Mensagem recebida por nadja@usp.br em 02 agosto 2010.

térmico de resíduos sólidos em Unidades de Recuperação de Energia – URE (informação pessoal).

Segundo esta Resolução, a utilização de RSD como fonte de energia renovável elimina os efeitos adversos de sua disposição direta no solo, agregando valor aos mesmos, e promove a adoção de uma alternativa sustentável principalmente em Regiões Metropolitanas do Estado de São Paulo, onde o volume de resíduos gerado é muito elevado e a disponibilidade de áreas é quase inexistente.

Em outubro de 2007, foi realizado o Workshop “Gerenciamento de Resíduos Sólidos – Uma visão de futuro”, reunindo especialistas da Secretaria de Meio Ambiente - SMA, Prefeitura de São Paulo e Estado da Baviera, para avaliar os resultados da segunda fase do projeto, onde as prefeituras signatárias – São Bernardo do Campo, Santos, Embu das Artes e Barueri – apresentaram o estágio em que se encontravam com relação à escolha de áreas, estudos de viabilidade, caracterização de resíduos e arranjos institucionais, visando a implantação de URE’s (MARTIN, 2007).

Através da Resolução Conjunta da Secretaria de Meio Ambiente – SMA e da Secretaria de Saneamento e Energia – SSE nº 49, de 18 de outubro de 2007, foi criado o Grupo de Trabalho para propor “um programa estadual de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos e outros rejeitos da atividade econômica” (SÃO PAULO, 2007). O principal objetivo deste Grupo de Trabalho tem sido:

(...) o estudo de instrumentos institucionais, legais e regulatórios de âmbito federal, estadual e municipais, com foco na Região Metropolitana de São Paulo, aplicáveis à implantação de empreendimentos de recuperação e conversão de resíduos sólidos urbanos em energia, propondo medidas para criar um ambiente institucional adequado ao desenvolvimento de empreendimentos metropolitanos combinados de manejo de resíduos e aproveitamento energético (SÃO PAULO, 2007, p.1).

Dentre os estudos realizados, encontra-se o estudo de modelagem de negócio para a implantação de empreendimento de geração de energia a partir de RSD no Estado de São Paulo e

o estudo de caracterização técnico operacional e de orçamentação para a implantação de Unidade de Tratamento Térmico e Energético de RSD no Estado de São Paulo (NEGRI, 2009).

A modelagem para o aproveitamento térmico e geração de energia a partir de RSD visa ao estudo de negócio para a implantação de empreendimento de geração de energia a partir de resíduos, para cada Região Metropolitana do Estado de São Paulo (Baixada Santista, Campinas e São Paulo) e Litoral Norte.

Como, destas regiões, a situação da Baixada Santista e do Litoral Norte é a mais problemática, os estudos de viabilidade para a implantação da URE foram primeiramente direcionados para as mesmas.

Para isso está sendo realizado o estudo da caracterização da produção e composição físico-química dos RSD da Região Metropolitana da Baixada Santista e do Litoral Norte, o estudo de viabilidade técnico econômica - EVTE para usina de tratamento térmico de RSD com geração de eletricidade com locação em um Município da Baixada Santista e Litoral Norte, para geração de energia térmica e a vapor. No longo prazo, prevê-se um estudo de viabilidade ambiental - EIA-RIMA na usina da Baixada Santista e Litoral Norte e um estudo de viabilidade técnico-econômica-ambiental – EVTE – EIA/RIMA em outras regiões (NEGRI, 2009).

Dentre os estudos já realizados encontra-se o estudo de caracterização técnico operacional, onde são definidos os dados básicos da Unidade de Tratamento Térmico de Resíduos – UTTR, conforme demonstrado ilustrado na Tabela 9.

Segundo Guedes¹⁴, a planta a ser construída, provavelmente possuirá capacidade de processamento de 1.200 t/dia (informação verbal). Para que esta usina seja viável, a tecnologia deverá ser utilizada para a geração de energia elétrica e/ou energia térmica (geração de vapor para uso industrial).

Após o tratamento térmico os resíduos têm seu volume diminuído em 90%, o que proporciona o prolongamento da vida útil dos aterros existentes e a minimização da necessidade de novos aterros.

¹⁴ GUEDES, R. Secretaria de Saneamento e Energia.

A produção de energia para uma planta desta dimensão tem capacidade para a geração de 26 MW, onde cerca de 7,7 MW seriam para consumo da própria usina e os restantes 18,3 MW representariam a potência média disponível para a venda. Isso permite o aumento da oferta e a desejada diversificação da matriz energética nacional, com um insumo alternativo e renovável.

Tabela 9 – Dados básicos da Unidade de Tratamento Térmico de Resíduos

Característica	Valor	Unidade
Capacidade de processamento de RSD	1200	t/dia
Poder Calorífico Inferior do RSD	1900	kcal/kg
Redução de volume de RSD	90	%
Potência Elétrica Instalada	26	MW
Potência Média Disponível para Venda	18,3	MW médios
Disponibilidade operacional média	85	%
Área coberta	10.000	m ²
Área total	30.000	m ²
Padrão de emissões atmosféricas	Resolução SMA -079/2009	
Condição dos RSU na alimentação das fornalhas	RSD <i>in natura</i> , conforme coletado	

Fonte: GUEDES¹⁵ (informação verbal).

A área total requerida pela usina é de 30.000 m² ocupando uma área relativamente pequena se comparada aos aterros, podendo ser instalada nas proximidades dos centros geradores de resíduos, com vantagens logísticas no transporte de resíduos, além da redução nos investimentos em transmissão da energia gerada na usina.

¹⁵ GUEDES, R. Secretaria de Saneamento e Energia.

O padrão de emissões atmosféricas obedecerá às condições de monitoramento de gases e aos limites dispostos na Resolução SMA 79/2009, sendo utilizados os mais modernos métodos e equipamentos de controle, permitindo a redução da emissão de gases do efeito estufa.

O tratamento térmico permite tratar os resíduos sem a necessidade de se efetuar nenhuma separação ou pré-processamento de resíduos, ao contrário de outras tecnologias de tratamento térmico, como a gaseificação.

Para a instalação da usina, cerca de 95% dos equipamentos podem ser desenvolvidos no Brasil, com tecnologia semelhante aos dos desenvolvidos na Alemanha. Apenas seria necessário importar a grelha, o que resulta em uma redução significativa de 1/3 no custo, que passaria de 200 milhões de euros para R\$ 200 milhões. Este custo de instalação da usina pode ser dividido basicamente em duas partes: 40% vão para equipamentos da parte operacional, e 60% para equipamentos de tratamento de gases (informação verbal)¹⁶.

Além deste estudo para a implantação de uma usina de incineração com recuperação de energia, outras iniciativas vêm sendo realizadas paralelamente no Estado de São Paulo.

Em São Sebastião, por exemplo, está em estudo a implantação de uma usina com capacidade de 150 t/dia, que gerará 2 Mw/h. Trata-se de uma planta auto-sustentável, ou seja, a energia gerada pelo processo será capaz de suprir as necessidades energéticas da própria usina. Segundo Pagliuso¹⁷, esta planta tem como objetivo o tratamento de Resíduos Sólidos Industriais.

Outro caso se refere a Bauru, onde devido ao término da vida útil do aterro de RSD está em estudo a possibilidade de instalação de uma usina para geração de vapor e energia elétrica, com capacidade para 500 t/dia e custo de implantação de R\$ 180 milhões.

¹⁶ SAVASTANO, A. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.

¹⁷ PAGLIUSO, J. D. **Tratamento térmico de resíduos: gaseificação ou combustão?** 1º Simpósio de Resíduos Sólidos. São Carlos, 2009.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados: o arcabouço teórico referente à localização ótima de unidades industriais, através do método de programação linear inteira mista; uma revisão dos trabalhos que utilizaram este método; a estruturação do modelo matemático para a definição da localização ótima de usinas de incineração de RSD, bem como a sua aplicação na região da Baixada Santista e Litoral Norte.

3.1 Modelos matemáticos de localização

O desenvolvimento de métodos para determinar a localização ótima de instalações tem sido uma área importante de pesquisas. Podem envolver modelos de simples aplicação que promovem soluções satisfatórias para os problemas estudados.

Os problemas abrangidos por tais métodos se atêm a algumas categorias discutidas por Ballou (2001):

- A localização de uma determinada instalação pode ser determinada mais comumente por um fator que é mais crítico que outros. Como, por exemplo, no caso de plantas e armazéns, os fatores econômicos são normalmente dominantes. Já no caso de uma prestadora de serviço, a acessibilidade ao local é um fator determinante.
- O problema envolvendo a localização de uma única instalação é diferente do problema de se encontrar diversas instalações ao mesmo tempo. O problema de uma única instalação não considera forças competitivas de demanda entre instalações, efeitos de consolidação de estoque e custos de instalações, considerando, em primeiro lugar, os custos de transporte.
- Existem métodos contínuos de localização, que selecionam a melhor alternativa dentro de um espaço contínuo. São os mais utilizados, na prática, para a localização de instalações múltiplas. Alternativamente, existem métodos de localização que selecionam a partir de uma lista de possíveis e plausíveis escolhas pré-selecionadas.

- Por vezes, devido a um número muito grande de configurações de projetos de rede a serem avaliados, é necessário usar relações entre dados agregados para conseguir gerenciar o problema e atingir uma solução, limitando as localizações a áreas geográficas amplas, como, por exemplo, cidades inteiras. Já métodos que utilizam poucos dados agregados, são capazes de diferenciar localizações separadas por uma única rua de uma cidade.
- Os métodos de localização podem ainda ser classificados pelo horizonte de tempo. Se um modelo cobre muitos anos de uma só vez, sendo os custos de instalação fixos, mas os custos de transporte altos, tal plano de localização para multiperíodos são chamados de dinâmicos. Mas se os métodos de localização se baseiam em um horizonte de tempo abrangendo um único período, são chamados de natureza estática.

Segundo Chopra e Meindl (2011), os modelos matemáticos de localização ótima são usados para decidir sobre locais onde as instalações serão estabelecidas e a capacidade atribuída a cada uma delas, sendo importante os gestores tomarem a devida decisão considerando o horizonte de tempo nos quais as instalações e capacidades não venham a ser alteradas.

Neste trabalho o problema de localização envolve a localização de instalações múltiplas, sendo um problema complexo pois as instalações “não podem ser tratadas como economicamente independentes, e o número de configurações possíveis da localização se torna enorme” (BALLOU, 2001). Devido a isso, torna-se interessante apresentar o método de localização matemático utilizado neste trabalho, categorizado por Ballou (2001) como exato: o método de programação linear e inteira¹⁸.

Os métodos exatos referem-se a procedimentos capazes de garantir uma solução ótima para o problema de localização, ou pelo menos uma solução perto do ideal. Normalmente, é uma abordagem ideal para o problema de localização, mas podem ocasionar o consumo de tempo de processamento do computador muito longo, uma grande necessidade de memória e uma definição de problema comprometida quando aplicada aos problemas práticos (BALLOU, 2001).

¹⁸ Os métodos de localização matemáticos podem ser categorizados como exatos, de simulação e heurísticos. Para maiores informações, vide Ballou (2001), p.387.

Segundo Caixeta-Filho (2001), seja qual for o algoritmo utilizado para a solução do problema de programação linear, alguns passos devem ser obedecidos: deve ser definido o objetivo básico do problema com respeito à otimização de uma função objetivo, podendo ser sua minimização ou maximização; logo em seguida, a definição das variáveis de decisão envolvidas, que serão as alternativas possíveis para a otimização; por fim, estas variáveis poderão estar sujeitas a uma série de limitações, que são as restrições do problema.

Todas essas expressões, entretanto, devem estar de acordo com a hipótese principal de programação linear, que diz respeito à linearidade propriamente dita, ou seja, todas as relações entre variáveis devem ser lineares. Isso implica a proporcionalidade das contribuições envolvidas (por exemplo, a contribuição individual de cada variável é estritamente proporcional a seu valor), assim como a aditividade dessas contribuições (por exemplo, a contribuição total de todas as variáveis é igual à soma de todas as contribuições individuais, independentemente do valor das variáveis) (CAIXETA-FILHO, 2001, p.11).

A partir dos pesquisadores que utilizaram o método de programação linear e inteira, Ballou (2001) descreve o problema de localização de instalações da seguinte maneira:

Encontre o número, o tamanho e as localizações de armazéns em uma rede logística que minimizarão os custos fixos e variáveis que movimentarão todos os produtos através da rede selecionada sujeito às seguintes condições:

1. O suprimento disponível da planta não pode ser excedido para cada produto.
2. A demanda para todos os produtos deve ser satisfeita.
3. O processamento de cada armazém não pode exceder a sua capacidade.
4. Um processamento mínimo de um armazém deve ser alcançado antes que ele possa ser aberto.
5. Todos os produtos para o mesmo cliente devem ser atendidos pelo mesmo armazém (BALLOU, 2001, p.389).

Genericamente, Chopra e Meindl (2011) apresentam um modelo de programação linear e inteira, o qual é apresentado a seguir. Tal modelo considera uma cadeia de suprimentos onde os

fornecedores enviam material às fábricas, que abastecem os depósitos com produtos, que por sua vez, abastecem os mercados, conforme está esquematizado na Figura 4.

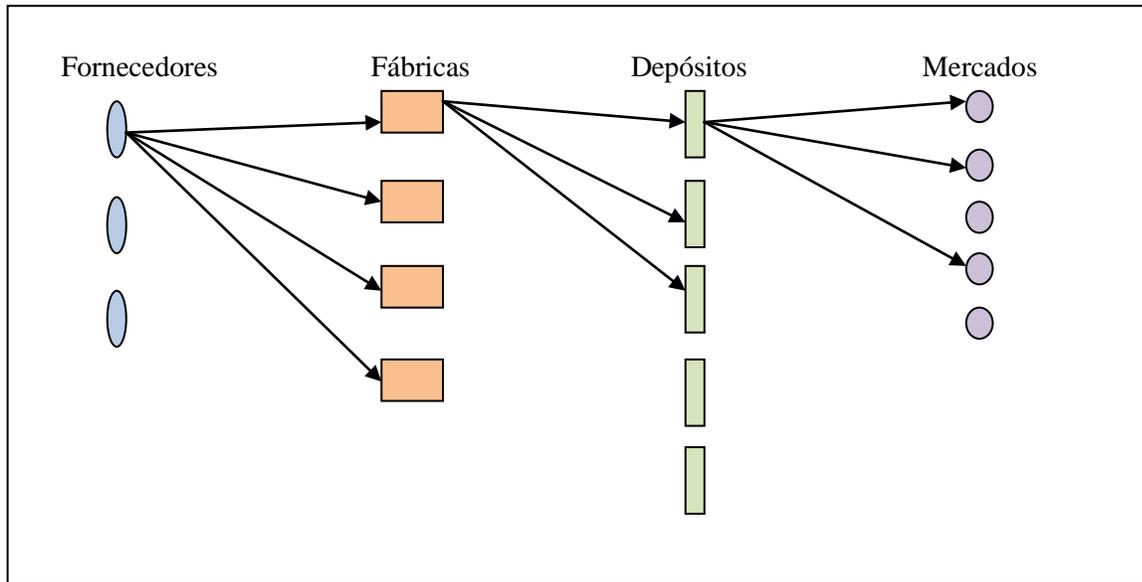


Figura 4 – Estágios em uma rede de suprimentos

Fonte: Chopra e Meindl (2011).

As decisões de localização e capacidade precisam ser realizadas tanto para fábricas como para depósitos, sendo que vários depósitos podem ser usados para atender à demanda em um dado mercado e várias fábricas podem ser usadas para abastecer os depósitos. A estrutura matemática deste modelo considera os seguintes parâmetros e variáveis:

m = número de mercados ou pontos de demanda

n = número de locais de fábrica em potencial

l = número de fornecedores

t = número de locais de depósito em potencial

D_j = demanda anual do cliente j

K_i = capacidade em potencial da fábrica no local i

S_h = capacidade de suprimento no fornecedor h

W_e = capacidade de depósito em potencial no local e

F_i = custo fixo de localizar uma fábrica no local i

f_e = custo fixo de localizar um depósito no local e

C_{hi} = custo de embarcar uma unidade da fonte de suprimentos h para a fábrica i

C_{ie} = custo de produzir e embarcar uma unidade da fábrica i para o depósito e

C_{ej} = custo de embarcar uma unidade do depósito e para o cliente j

Busca-se identificar as localizações das fábricas e depósitos, assim como os fluxos de quantidades entre os diversos pontos, que minimizem os custos fixos e variáveis totais. As variáveis de decisão, então, serão:

$y_i = 1$ se a fábrica estiver localizada no local i , 0 caso contrário

$y_e = 1$ se o depósito estiver localizado no local e , 0 caso contrário

x_{ej} = quantidade embarcada do depósito e ao mercado j

x_{ie} = quantidade embarcada da fábrica no local i ao depósito e

x_{hi} = quantidade embarcada do fornecedor h para a fábrica no local i

A função objetivo, que envolve a minimização dos custos fixos e variáveis totais da rede, é apresentada da seguinte forma:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n F_i y_i + \sum_{e=1}^t f_e y_e + \sum_{h=1}^l \sum_{i=1}^n C_{hi} x_{hi} + \sum_{i=1}^n \sum_{e=1}^t C_{ie} x_{ie} + \sum_{e=1}^t \sum_{j=1}^m C_{ej} x_{ej} \quad (1)$$

Esta função objetivo deverá estar sujeita a algumas restrições:

$$\sum_{i=1}^n x_{hi} \leq S_h \quad \text{para } h = 1, \dots, l \quad (2)$$

Esta restrição especifica que um fornecedor não pode enviar uma quantidade que exceda sua capacidade.

$$\sum_{h=1}^l x_{hi} - \sum_{e=1}^t x_{ie} \geq 0 \quad \text{para } i = 1, \dots, n \quad (3)$$

A quantidade expedida de uma fábrica não pode ser superior à quantidade de matéria-prima recebida pela mesma. Neste modelo, assume-se que uma unidade de entrada de matéria-prima produza uma unidade de produto final.

$$\sum_{e=1}^t x_{ie} \leq K_i y_i \quad \text{para } i = 1, \dots, n \quad (4)$$

A quantidade produzida na fábrica não pode exceder a sua capacidade de produção.

$$\sum_{i=1}^n x_{ie} - \sum_{j=1}^m x_{ej} \geq 0 \quad \text{para } e = 1, \dots, t \quad (5)$$

A quantidade de produtos que sai de um depósito não pode exceder a quantidade recebida das fábricas.

$$\sum_{j=1}^m x_{ej} \leq W_e y_e \quad \text{para } e = 1, \dots, t \quad (6)$$

A quantidade enviada por um depósito não pode exceder sua capacidade de armazenagem.

$$\sum_{j=1}^m x_{ej} = D_j \quad \text{para } j = 1, \dots, m \quad (7)$$

A quantidade enviada a um cliente deve satisfazer a demanda.

$$y_i, y_e \in \{0,1\}, x_{ej}, x_{ie}, x_{hi} \geq 0 \quad (8)$$

Esta restrição impõe que cada fábrica ou depósito esteja aberto ou fechado.

Este modelo pode ser modificado para permitir fluxos diretos entre fábricas e mercados, bem como acomodar economias de escala em custos de produção, transporte e estoque. Porém, adicionar tais fatores torna o modelo mais difícil de ser solucionado.

Os problemas de localização que utilizam métodos de programação linear e inteira apresentam algumas limitações. Uma delas está relacionada às suas características estáticas.

Está implícito no modelo que a solução é ótima para um equilíbrio de longo prazo. No entanto, o modelo se torna menos eficiente, quando se assume a ocorrência de

mudanças, tanto no lado da oferta quanto do lado da demanda. Alternativa para incorporar tais variações diz respeito à utilização da programação dinâmica nos estudos de localização, acrescentando-se à determinação da melhor localização a identificação do período em que uma nova firma deverá ser aberta (LOPES, 1997, p.34).

Os modelos de localização dinâmicos incorporam o fator tempo em sua modelagem. Devido a isto, são de difícil solução. Zucchi (2010, p. 104) acrescenta que

(...) haja vista sua maior complexidade ao captar aspectos relevantes da realidade, demanda, assim, maior conjunto de dados se comparados aos modelos estáticos. Porém, o desenvolvimento de algoritmos de otimização e a maior capacidade de processamento e memória dos computadores têm possibilitado a resolução de problemas complexos.

3.2 Aplicação empírica de modelos matemáticos de localização

Estão exemplificados nesta seção alguns exemplos de aplicações empíricas de modelos matemáticos de localização que utilizaram métodos de programação linear e inteira.

Lopes (1997) analisou a distribuição ótima de granjas suínolas no Estado de Goiás, tendo como objetivo a minimização dos custos de transporte, tanto de matéria-prima como de produtos finais, e a minimização dos custos de instalação das granjas. Foram considerados três cenários distintos: um, representando o nível de consumo *per capita* de carne suína da época e, outros dois, representando as perspectivas de consumo para o setor. Os resultados mostraram que as granjas maiores prevaleceram em relação aos demais tamanhos inseridos no modelo, demonstrando as economias de escala presentes no setor. Também foi mostrado que a região sul do Estado apresentou a maior concentração de suinocultura.

Ramos (2001) aplicou o modelo matemático de localização ao setor de laranja para encontrar a localização ótima de *packing-houses* em regiões representativas do Estado de São Paulo, conforme sete capacidades diferentes de processamento, visando à minimização dos custos de implantação, processamento e transporte da laranja. Foram analisados quatro cenários distintos, os quais faziam considerações sobre oferta e demanda e restrições envolvendo o número de *packing-houses* instalados por região. Os resultados sugeriram a priorização da instalação de *packing-houses* de grande porte, possibilitando economias de escala e, as regiões mais próximas dos centros consumidores se sobressaíram na escolha ótima do modelo.

Gandelini e Caixeta-Filho (2007) avaliaram os melhores locais para a instalação de aterros sanitários e os melhores fluxos de resíduos entre algumas cidades do Estado de São Paulo. Foi utilizado um modelo de programação linear e inteira aplicado a três cenários distintos, que consideravam diferentes Índices de Qualidade de Resíduos – IQR como fator limitante para a recepção de resíduos pelos aterros sanitários. Como resultado, percebeu-se que conforme se limitavam as localidades que deveriam ser utilizadas como depósitos de lixo, em termos de IQR, os custos de disposição aumentavam.

Oliveira (2005) desenvolveu um modelo para encontrar a localização e tamanhos ótimos de armazéns coletores de açúcar, considerando o uso do modal rodoviário para o transporte do açúcar ao porto, ou também, considerando a realização de um transbordo para o modal ferroviário ou para armazenagem do produto para comercialização posterior. Os resultados apontaram para a construção de terminais intermodais, sugerindo um aumento na participação do modal ferroviário, variando o tamanho e a localização dos mesmos, de acordo com os quatro cenários especificados.

Ferrari (2006) procurou identificar a localização ótima para a instalação de armazéns graneleiros para soja no estado do Mato Grosso, através de um modelo de localização, procurando minimizar os custos de transporte e armazenagem deste produto até os portos exportadores e o custo de instalação dos armazéns. Foram propostos quatro cenários diferentes, que consideravam a possibilidade de alterações da demanda, existência de economias de escala nos custos de construção dos armazéns e a modificação na participação dos armazéns nas demandas dos portos. Pela aplicação do modelo, percebeu-se, de uma maneira geral nos quatro cenários, a necessidade de ampliação da capacidade estática dos armazéns no Mato Grosso.

Xavier et al. (2007) utilizaram um modelo matemático de programação linear e inteira para determinar a melhor localização e estabelecer as dimensões ótimas das unidades frigoríficas de abate de bovinos no Mato Grosso do Sul. Comparando-se três cenários a um cenário de *benchmark*, verificou-se que o atual complexo de frigoríficos bovinos, nesse Estado, já apresenta uma boa distribuição espacial. Os custos com frete de carnes já estariam próximos do nível ótimo indicado e, apenas os fretes com gado e o dimensionamento das unidades frigoríficas deveriam ser melhorados.

Zucchi (2010) utilizou um modelo matemático de otimização dinâmico para determinar quais os melhores locais para a instalação de frigoríficos-abatedouros exportadores no Brasil,

buscando a minimização dos custos associados ao transporte e a instalação de novas unidades industriais de abate. Foram considerados quatro cenários alternativos, onde se fixava que em uma parte dos Estados considerados no modelo deveria ser implantado ao menos um frigorífico-abatedouro exportador. Como resultado, o Estado de São Paulo foi apontado como devendo ter a maior parte dos frigoríficos-abatedouros exportadores, fato explicado pela autora devido ao Porto de Santos ser o principal ponto de escoamento da carne bovina desossada congelada aos mercados externos.

Bartholomeu e Caixeta-Filho (2011) propuseram um modelo matemático para a localização ótima de unidades de tratamento de Resíduos Sólidos de Saúde – RSS, no Estado de São Paulo, buscando maximizar a receita potencial auferida por estas unidades e, em conjunto, minimizar os custos logísticos de todo o sistema de alocação de resíduos no Estado. Foram avaliados 7 cenários diferentes, sendo que os mesmos se referiam ao número de novas unidades a serem implantadas e suas respectivas capacidades de processamento. Como resultado da aplicação do modelo proposto, as principais cidades indicadas para a implantação de novas unidades de tratamento de RSS foram: Jaú e Campinas, seguidas de São José do Rio Preto, Salto de Pirapora e Ribeirão Preto.

3.3 Modelo Proposto

A modelagem adotada neste estudo envolve a solução de um problema de localização ótima para usinas de incineração de RSD, a partir de métodos de programação linear e inteira. Esta modelagem é baseada nos modelos encontrados em Bartholomeu e Caixeta-Filho (2011) e Gandelini e Caixeta-Filho (2007).

3.3.1 Especificação do modelo

O objetivo central do modelo de localização utilizado neste estudo é identificar a localização ótima para usinas de incineração de RSD, de forma que o lucro do processo de incineração seja maximizado.

A modelagem matemática baseia-se na consideração do fluxo de RSD produzidos em cada Município até a usina, sendo o transporte realizado pelo modal rodoviário e cada unidade produtora podendo ser uma potencial unidade receptora/usina.

As usinas possuem capacidade estática, sendo determinadas, previamente, quantas usinas de incineração se deseja instalar.

Desta forma, o resultado do modelo mostrará a localização ótima para a instalação das usinas de incineração de resíduos; os fluxos de resíduos a partir de cada Município a cada usina de incineração; os aterros sanitários para onde serão destinadas as escórias e cinzas geradas, de forma a maximizar o lucro do processo de incineração, respeitando-se as restrições impostas pelo modelo.

3.3.2 Representação Diagramática

A Figura 5 mostra esquematicamente o fluxo de resíduos gerados diariamente em cada Município i para as q possíveis usinas de incineração j . Nas usinas de incineração os resíduos gerados no dia n são incinerados e transformados em cinzas e escórias, sendo encaminhadas aos aterros sanitários para disposição final.

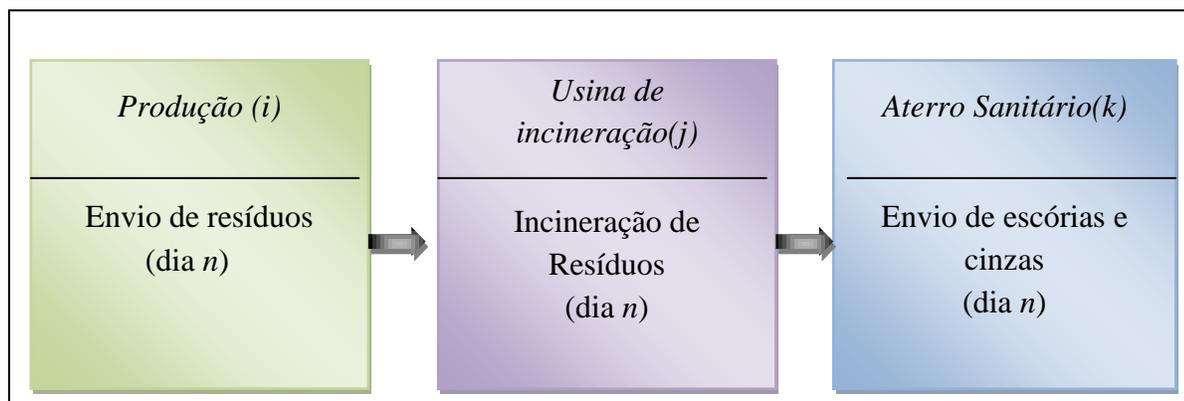


Figura 5 – Representação diagramática do modelo de localização ótima

3.3.3 Representação Matemática

Este modelo foi elaborado assumindo-se que o processo de incineração seja operado pelo poder público. Se fosse direcionado à iniciativa privada teriam que ser levados em consideração

os seguintes aspectos: a receita pela venda do serviço de incineração de RSD prestado aos Municípios; a não consideração do custo com o transporte de resíduos, se o mesmo fosse realizado pelos Municípios; e a receita e o custo pelo transporte de resíduos, se o mesmo fosse de responsabilidade da usina.

A função objetivo trata da maximização de lucro do processo de incineração de RSD, podendo existir uma ou mais unidades de tratamento.

A receita é auferida através da geração de energia (podendo ser acrescentadas a geração de vapor, água quente e água fria para uso industrial, não considerado neste modelo por falta de informação a respeito das características técnicas destes produtos da incineração), pelo ganho com a redução de emissão de poluentes, medido pela produção de CO₂ evitada durante o processo de incineração (que pode ser convertido em créditos de carbono) e pela venda das escórias e cinzas para o uso na construção civil (já existe tecnologia para isso, resta saber se existirá demanda para este insumo).

O custo total considera o custo com o transporte de resíduos dos Municípios geradores até cada usina de incineração, o custo de operação de cada usina e o custo com a disposição final das escórias e cinzas.

São considerados:

m Municípios geradores de resíduos;

q Municípios potenciais para a instalação da usina de incineração;

p Municípios onde se encontram os possíveis aterros receptores das escórias e cinzas da usina de incineração;

o períodos de tempo medidos em dias.

Segue o modelo básico, sendo apresentados os respectivos significados de cada componente das equações e inequações:

Função Objetivo:

$$MAX Z \quad (9)$$

$$Z = RECEITA - CUSTO \quad (10)$$

$$RECEITA = GERAÇÃO DE ENERGIA + REDUÇÃO DE EMISSÕES + \quad (11)$$

$$+ USO DE ESCÓRIAS$$

$$CUSTO = TRANSPORTE + OPERAÇÃO + DISPOSIÇÃO DE ESCÓRIAS \quad (12)$$

$$GERAÇÃO DE ENERGIA = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^q \sum_{n=1}^o x_{ijn} \times M \times PE_j \quad (13)$$

$$REDUÇÃO DE EMISSÕES = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^q \sum_{n=1}^o x_{ijn} \times R \times PCCC \quad (14)$$

$$USO DE ESCÓRIAS = \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^p \sum_{n=1}^o e_{jkn} \times G \times PECC$$

(15)

$$TRANSPORTE = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^q \sum_{n=1}^o x_{ijn} \times ct_{ijn} \quad (16)$$

$$OPERAÇÃO = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^q \sum_{n=1}^o x_{ijn} \times co_j \quad (17)$$

$$DISPOSIÇÃO DE ESCÓRIAS = \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^p \sum_{n=1}^o e_{jkn} \times ctr_{jkn} + \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^p \sum_{n=1}^o e_{jkn} \times coa_k \quad (18)$$

Sendo que:

Z = valor da função objetivo, que maximiza o lucro da usina de incineração.

x_{ijn} = quantidade de resíduos produzida no Município i e incinerada na usina de incineração localizada no Município j .

M = parâmetro associado à quantidade de MWh/t de RSD.

R = parâmetro associado à quantidade de CO_2/t de RSD¹⁹.

PE_j = preço de venda da energia elétrica caso a usina esteja localizada no Município j .

$PCCC$ = preço de comercialização de créditos de carbono.

G = parcela das escórias e cinzas que serão aproveitadas na construção civil, variando de 0 a 100% deste material.

$PECC$ = preço de venda das escórias e cinzas para a construção civil.

ct_{ijn} = custo de transporte dos resíduos produzidos no Município i e incinerados na usina de incineração localizada no Município j .

co_j = custo operacional da usina de incineração localizada no Município j .

F = fator pelo qual o volume de resíduos são reduzidos após passagem pelo processo de incineração.

ctr_{jkn} = custo de transporte do material inerte da usina de incineração localizada no Município j ao aterro sanitário localizado no Município k .

coa_k = custo de operação do aterro sanitário localizado no Município k .

e_{jkn} = escórias e cinzas geradas pelo processo de incineração.

B_j = variável binária (do tipo 0-1) associada à instalação ou não de uma usina de incineração no Município j .

Restrições consideradas:

a) O deslocamento de resíduos a partir do Município i não deve ser superior à produção do próprio Município:

$$\sum_{j=1}^n x_{ijn} \leq S_{in}, \text{ para todo } i \text{ e } n \quad (19)$$

¹⁹ Estes parâmetros podem ser obtidos, inicialmente, por meio dos valores apresentados por Henriques (2004).

Em que:

S_{in} = quantidade de resíduos produzida no Município i .

- b) O total de resíduos enviados pelos Municípios i deve esgotar a capacidade de cada usina localizada no Município j .

$$\sum_{i=1}^m x_{ijn} = \text{capusi}_{jn} \times B_j \quad \text{para todo } j \text{ e } n \quad (20)$$

Em que:

capusi_{jn} = capacidade mensal de incineração da usina localizada no Município j .

- c) Número máximo de usinas que podem ser instaladas:

$$\sum_{j=1}^n B_j \leq \text{num} \quad (21)$$

Em que:

num = número máximo de usinas que se deseja instalar.

- d) Após passar pelo processo de incineração, os resíduos são reduzidos a 10% do seu volume inicial, sendo este montante representado pelas escórias e cinzas:

$$\sum_{j=1}^m e_{jkn} = \text{capusi}_{jn} \times B_j \times F \quad \text{para todo } k \text{ e } n \quad (22)$$

- e) Havendo demanda para o uso das escórias e cinzas a fins alternativos, como insumo na construção civil ou pavimentação de ruas, uma parte ou a totalidade deste material poderá ser

destinado a estes fins. Desta forma, o material restante, não utilizado, pode ser enviado para aterros sanitários, respeitando a capacidade de recepção dos mesmos:

$$\sum_{j=1}^m e_{jkn} \times (1-G) \leq \text{capat}_{kn} \quad \text{para todo } k \text{ e } n \quad (23)$$

capat_{kn} = capacidade de recepção do aterro localizado no Município k .

A estrutura matemática representada foi compilada e processada através da linguagem de otimização GAMS, estando disponível no Apêndice B.

3.4 Especificação dos dados

3.4.1 Delimitação da área de estudo

A Região Metropolitana da Baixada Santista e o Litoral Norte foram as regiões escolhidas para a aplicação da modelagem desenvolvida neste estudo, devido à quase exaustão dos aterros sanitários que atendem aos Municípios que as compõem e por nestas estarem sendo desenvolvidos, através do Governo do Estado de São Paulo, estudos de viabilidade para a implantação de uma usina de incineração de RSD com recuperação energética.

Na RM da Baixada Santista e Litoral Norte,

(...) a questão da disposição de resíduos sólidos registrou grande avanço em anos recentes, com o desenvolvimento de um bom aterro em Santos (utilizado por este Município, Bertioga, Cubatão, Guarujá e Itanhaém) e outros Municípios (Mongaguá, Praia Grande e São Vicente) depositando seus resíduos em um segundo aterro igualmente bem avaliado pela CETESB, mas a uma grande distância (em Mauá, na RMSP). Apenas Peruíbe continua destinando seus resíduos para um aterro sanitário que chegou a receber Licença de Instalação (LI), mas nunca obteve a Licença de Operação (LO), e vem sendo sistematicamente mal avaliado pela CETESB desde 2002, na

contramão dos demais Municípios. Ocorre que alguns destes Municípios praticam um transbordo de resíduos para otimizar o transporte, o que nem sempre é feito em condições ambientais adequadas, além disso, o reaproveitamento e a reciclagem de resíduos sólidos na Região Metropolitana da Baixada Santista são muito limitados, demandando ações planejadas e concatenadas de longo prazo. Trata-se de uma mudança cultural difícil de ser fomentada, mas de cunho estratégico importante não apenas para resgatar uma relação mais digna dos municípios com seu meio ambiente, mas também para não comprometer a vida útil dos aterros sanitários utilizados, cuja substituição por novas unidades envolve muito mais do que grandes investimentos, um potencial ônus político em conflitos de vizinhança (SÃO PAULO, 2010c, p.22).

A Figura 6 apresenta os 13 Municípios que fazem parte da Região Metropolitana da Baixada Santista e do Litoral Norte.



Figura 6 – Municípios da Baixada Santista e Litoral Norte

Fonte: Gismaps Sistemas.

3.4.2 Geração de RSD

Para efeito da aplicação da modelagem proposta, assumiu-se que a quantidade coletada de RSD é representativa da quantidade gerada em cada Município, pois, de acordo com o Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico realizado em cinco dos treze Municípios estudados, a

abrangência de coleta é bem próxima ou igual a 100% da população, como pode ser verificado na Tabela 10.

Tabela 10 – Abrangência da Coleta de RSD em Municípios da Baixada Santista e do Litoral Norte

Município	Abrangência da Coleta (% da população)
Ilhabela	98
Itanhaém	94
Peruíbe	100
Santos	100
São Vicente	100

Fonte: Elaboração Própria a partir de Itanhaém (2010), São Paulo (2010b), São Paulo (2010c), São Paulo (2010d) e São Paulo (2011).

Entretanto, não se pôde, para esta pesquisa, elaborar uma base de dados da real quantidade de resíduos coletada diariamente nos Municípios, pois alguns apenas informaram uma dimensão geral do quanto seja coletado diariamente, outros possuíam apenas informações mensais ou anuais, sem contar com aqueles que não souberam informar, por não fazerem nenhum tipo de acompanhamento.

Sendo assim, a quantidade de RSD gerada representa apenas uma estimativa, a partir das informações obtidas através do contato com as próprias Prefeituras ou através do Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico de alguns Municípios, elaborado pela Secretaria de Saneamento e Energia.

Foi levado em consideração que os Municípios RM da Baixada Santista e do Litoral Norte, exceto Cubatão, possuem como característica comum o aumento na geração de resíduos nos meses de alta temporada (dezembro – fevereiro) em relação aos meses demais meses do ano, por serem cidades turísticas. Cada Município, devido a alguma peculiaridade, apresenta uma proporção de aumento nos meses de alta temporada diferente dos demais.

Com base nestas informações, foi elaborada a Tabela 11 que mostra a geração de RSD diária nos Municípios da Baixada Santista e Litoral Norte, utilizada para alimentar o modelo proposto.

Tabela 11 – Estimativa da quantidade de RSD gerada diariamente nos Municípios da Baixada Santista e do Litoral Norte

Município	Qtde t/dia (Meses de Baixa Temporada)	Qtde t/dia (Meses de Alta Temporada)
Bertioga	76,9	134,6
Caraguatatuba	96,15	200
Cubatão	92,3	92,3
Guarujá	184,8	369,6
Ilhabela	41,27	190
Itanhaém	65	195
Mongaguá	69,2	92,3
Peruíbe	69	138
Praia Grande	346	1038
Santos	577	692
São Sebastião	29,2	58,4
São Vicente	430	494
Ubatuba	61,5	230,8
Total	2138,32	3925

Fonte: Prefeituras dos Municípios.

Nota-se que nos meses de alta temporada, a quantidade de resíduos produzida nestes Municípios, em média, chega a dobrar.

3.4.3 Custo de transporte

Para estimar o custo de transporte do fluxo entre os Municípios foram adotadas faixas de distância onde, de acordo com a distância enquadrada para o fluxo entre um Município i e um Município j qualquer, ou qualquer combinação entre os i , j e k Municípios adotada no modelo, o custo por quilômetro rodado seja determinado, de forma a representar o crescimento decrescente do custo unitário de transporte em função das distâncias percorridas. A partir da Tabela 12 podem-se verificar os custos de transporte estimados.

Estas estimativas foram obtidas a partir do custo de transporte de resíduos de cada Município até o aterro onde são depositados, informado pelas Prefeituras neste estudo. Optou-se por se estabelecer faixas de distância onde o custo de transporte por km percorrido entre dois Municípios seja determinado, por não haverem dados suficientes para a elaboração de uma regressão linear para estimar este custo a cada distância entre Municípios individualmente.

Tabela 12 – Custo de transporte por faixa de distância entre os Municípios da Baixada Santista e do Litoral Norte

Faixa de Distância (km)	Custo de Transporte por km rodado (R\$)
0 - 15	2,25
16 - 30	1,77
31 - 45	1,64
45 - 60	1,5
61 - 75	1,43
76 - 90	1,3
91 - 105	1,23
105 - 120	0,94
121 -	0,4

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados desta pesquisa.

Como nem todos os Municípios colaboraram com esta informação, e como não há outra fonte possível, para aquelas faixas de distância onde não havia dados para o custo de transporte, optou-se por calcular o ponto médio entre as faixas que possuíam a estimativa.

A partir daí, foi calculado o custo de transporte de cada Município i para cada potencial usina localizada no Município j , multiplicando a distância total (vide Anexo B) entre os dois Municípios pelo custo de transporte por km rodado apresentado pela faixa de distância correspondente (vide resultados no Anexo C).

3.4.4 Municípios potenciais para a instalação da usina

Os 13 Municípios analisados neste trabalho foram considerados potenciais receptores para a instalação da usina de incineração. Isto representa um fator limitante ao modelo, pois não foram consideradas outras questões relevantes para a instalação da usina, como a pré-disposição da Prefeitura em aceitar tal empreendimento no Município, a opinião pública, a disponibilidade de áreas em cada Município etc.

3.4.5 Parâmetros técnicos da usina

A Tabela 13 mostra os parâmetros técnicos da usina de incineração utilizados para alimentar o modelo.

Tabela 13 – Parâmetros técnicos da usina de incineração de RSD

Dado Técnico	Valor	Unidade
Capacidade de processamento*	1.200	t RSD/dia
Volume de RSD após o processamento*	10	%
Potencial energético**	0,523	MWh/t RSD
Redução de emissões de CO ₂ ***	1,5	t CO ₂ /t RSD
Custo de operação e manutenção****	210	R\$/t RSD

Fonte: * Secretaria de Saneamento e Energia

** EPA (2002) apud Henriques (2004)

*** Henriques (2003) apud Henriques (2004)

**** GUEDES, R. Mensagem recebida por nadja@usp.br em 29 junho 2011.

Os parâmetros associados à capacidade de processamento da usina e o volume de RSD após a passagem pelo processo de incineração foram obtidos diretamente com a Secretaria de Saneamento e Energia, conforme o estudo para a instalação da usina na Baixada Santista e Litoral Norte, apresentado na Tabela 9.

Atualmente, a grande maioria da tecnologia de incineradores instalados pode gerar de 0,4 a 0,6 MWh/t RSD (USINA VERDE, 2009a). EPA (2002) apud Henriques (2004) considera que os incineradores podem produzir até 0,55 MWh/t RSD que, contando com perdas de transmissão na ordem de 5% do total produzido, pode chegar a 0,523 MWh/t RSD. Desta maneira, o parâmetro associado ao potencial energético da usina de incineração considera a produção de 0,523 MWh/t RSD.

Henriques (2003) apud Henriques (2004) estima a emissão evitada por unidade energética (t CO₂/MWh) através da tecnologia de incineração de resíduos, bem como qual a quantidade de resíduos necessária para se obter uma unidade de MWh (t RSD /MWh). Para este trabalho, foi calculado o valor da quantidade de resíduos por MWh (t RSD /MWh) como sendo inverso do potencial energético apresentado na Tabela 13, que é igual a 1,91. Obedecendo a proporção entre os dois parâmetros estimados por Henriques (2003) apud Henriques (2004), é possível calcular o valor da emissão evitada (t CO₂/MWh) para a usina de incineração apresentada neste trabalho, chegando 2,865 t CO₂/MWh. Desta forma, a redução de emissões por tonelada de RSD (t CO₂/t

RSD) foi calculada da seguinte maneira: $(t \text{ CO}_2/\text{MWh}) / (t \text{ RSD}/\text{MWh}) = 2,865/1,91 = 1,5 t \text{ CO}_2/t \text{ RSD}$, ou seja, cada tonelada de RSD processada na usina de incineração é capaz de reduzir as emissões equivalentes a 1,5 t CO₂.

O custo de operação e manutenção da usina é estimado em R\$ 80 milhões/ano, equivalendo a cerca de R\$ 210/t de RSD.

3.4.6 Preço de venda da energia elétrica

Para estabelecer o preço de venda da energia elétrica gerada pela usina de incineração de RSD, foram verificadas junto à Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL as tarifas residenciais vigentes na região, não contemplando os tributos e outros elementos que fazem parte da conta de luz residencial. A Tabela 14 mostra a tarifa praticada em cada Município, expressa em R\$/kWh, de acordo com a concessionária de distribuição de energia elétrica operante em cada Município.

Tabela 14 – Tarifa de distribuição de energia elétrica vigente em cada Município, R\$/kWh

Município	Concessionária	Tarifa (R\$/kWh)
Santos São Vicente	CPFL Piratininga	0,31421
Caraguatatuba São Sebastião	EDP Bandeirante Energia SA	0,32537
Bertioga Cubatão Guarujá Ilhabela Itanhaém Mongaguá Peruíbe Praia Grande Ubatuba	Elektro	0,36604

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da ANEEL (2011) e sites das Concessionárias de energia elétrica.

Optou-se por considerar o preço médio praticado na região como possível valor de comercialização da energia elétrica produzida na usina, independentemente do Município escolhido, pois não foi obtida informação sobre como será distribuída a energia elétrica gerada: se através de acordo com a própria concessionária do Município, ou se para atender diretamente a indústrias vizinhas.

Este pode ser um fator limitante ao modelo, já que variações no preço de venda da energia elétrica, se significativas, poderiam interferir na escolha ótima do modelo. Entretanto, supor que o preço de venda praticado pela usina seja exatamente o mesmo praticado pelas concessionárias, em cada Município, pode não condizer com a realidade da usina, também interferindo na escolha ótima do modelo.

Desta forma, foi considerada a média tarifária praticada nos Municípios, no valor de R\$ 0,35181/kWh, para representar o preço de venda da energia elétrica gerada na usina. Sendo a unidade de medida para a energia elétrica no modelo em MWh, o preço de venda seria de R\$ 351,81/MWh, já que uma unidade de MWh equivale a mil unidades de kWh.

3.4.7 Preço de venda dos créditos de carbono

No Brasil, o mercado de créditos de carbono ainda não está desenvolvido, sendo as negociações realizadas na BMF&Bovespa através de leilões esporádicos, conforme a reunião de projetos de MDL, onde as características da oferta são divulgadas através de editais (BMF&Bovespa, 2011).

Sendo a ICE Futures Europe mercado líder mundial de venda de licenças emissões de dióxido de carbono (CO₂), como parâmetro para o preço de venda de créditos de carbono foi utilizado nesta pesquisa o valor de negociação de um de seus contratos futuros, o ICE ECX EUA FUTURES (ICE FUTURES EUROPE, 2011).

O ICE ECX EUA Futures é o contrato futuro onde cada membro de compensação com posição aberta, na data de vencimento do contrato, é obrigado a receber ou a entregar as licenças de emissão. Em 22/08/2011, este contrato, com vencimento para dez/11, o vencimento mais próximo negociado, encerrou o dia negociado a € 12,59/t de CO₂ (ICE FUTURES EUROPE, 2011). A cotação do Euro fechou neste dia a R\$ 2,30, de acordo com informação obtida no site

do Banco Central do Brasil²⁰. Convertendo para a moeda brasileira, cada tonelada de CO₂ seria então negociada a R\$ 28,96, sendo este o preço de venda de créditos de carbono utilizado para alimentar o modelo.

3.4.8 Potenciais aterros para a recepção de escórias e cinzas

Os aterros onde atualmente são destinados os RSD de cada Município serão considerados potenciais unidades de recepção das escórias e cinzas, com exceção do lixão localizado no Município de Peruíbe, por não se enquadrar como um local de disposição adequada de resíduos.

Foi considerada a quantidade total de envio dos Municípios analisados a cada potencial aterro como sendo a capacidade de recepção dos mesmos, pois alguns aterros recebem resíduos de outros Municípios que não fazem parte desta pesquisa. Desta maneira, não seria afetada a configuração atual destes aterros sanitários, evitando uma possível sobrecarga.

3.5 Cenários para a modelagem proposta

Para verificar a sensibilidade do resultado encontrado através do uso do modelo original, foram especificados quatro cenários, os quais são descritos nas próximas seções.

3.5.1 Cenário 1

Este cenário – base considera a utilização do modelo original para a localização ótima de apenas uma usina de incineração de RSD.

Este cenário é relevante pois pretende-se instalar nestas regiões uma única usina, por parte do Governo do Estado de São Paulo. Os estudos estão sendo realizados para esta realidade.

Com isso, a eq. (21), que define o número máximo de usinas que podem ser instaladas, seria modificada, sendo o modelo forçado a encontrar a solução ótima para uma única usina, assumindo a seguinte forma:

²⁰ BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxas de Câmbio**. Disponível em: <http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/PtaxRPesq.asp?idpai=TXCOTACAO>. Acesso em: 22 ago. 2011.

$$\sum_{j=1}^n B_j = 1 \quad (21a)$$

3.5.2 Cenário 2²¹

Uma modelagem matemática tem como característica o fato de ser uma simplificação da realidade. A complexidade das relações entre todas as variáveis não é possível de ser representada em sua totalidade por um modelo. Sem contar que o tomador de decisão, normalmente, deve levar em consideração outros fatores não objetivos como aqueles encontrados em modelagem matemática, como aspectos políticos, culturais, legais.

Desta maneira, no cenário 2 é criado um *ranking* de possíveis localizações para a usina de incineração. O modelo é alimentado com os dados da mesma forma que no cenário 1 e a cada escolha ótima encontrada pelo modelo, elimina-se o Município apontado como representando a localização ótima para a instalação da usina de incineração, da próxima escolha, até que todos os Municípios sejam escolhidos.

3.5.3 Cenário 3

O cenário 3 considera o uso de aterros sanitários como uma alternativa para disposição final dos RSD, levando em conta a possibilidade de redução de emissões através da queima de biogás e geração de energia. Pode-se assim, de certa forma, verificar-se a viabilidade de se implantar a usina de incineração nesta região ante à possibilidade de se destinar os RSD através de outra tecnologia, neste caso, enviando para aterros sanitários.

O modelo original passa a ser modificado da seguinte maneira:

1) Na função objetivo:

$$GERAÇÃO DE ENERGIA = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{n=1}^o x_{ijn} \times M + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^p \sum_{n=1}^o y_{ikn} \times MA \right) \times PE \quad (13a)$$

²¹ Vale esclarecer que o Cenário 2 em nada difere do Cenário 1. Entretanto, optou-se por separar os resultados do *ranking* entre a melhor solução (Cenário – base = Cenário 1) e as demais (cenário 2) para facilitar a comparação com os Cenários 3 e 4.

$$REDUÇÃO DE EMISSÕES = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{n=1}^o x_{ijn} \times R + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^p \sum_{n=1}^o y_{ikn} \times RA \right) \times PCCC \quad (14a)$$

$$TRANSPORTE = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{n=1}^o x_{ijn} \times ct_{ijn} + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^p \sum_{n=1}^o y_{ikn} \times ctra_{ikn} \quad (16a)$$

$$OPERAÇÃO = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{n=1}^o x_{ijn} \times co_j + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^p \sum_{n=1}^o y_{ikn} \times coa_k \quad (17a)$$

2) Na restrição representada pela eq. (19):

$$\sum_{j=1}^n x_{ijn} + \sum_{k=1}^p y_{ikn} \leq S_{in}, \text{ para todo } i \text{ e } n \quad (19a)$$

onde:

y_{ikn} = quantidade de resíduos produzida no Município i e dispostos no aterro sanitário localizado no Município k .

Assim, a geração de resíduos em cada Município será destinada através de alguma composição entre a usina de incineração e os aterros sanitários.

3) Na restrição representada pela eq. (21):

$$\sum_{j=1}^n B_j \leq 1 \quad (21b)$$

A solução do modelo pode, desta maneira, escolher implantar uma usina ou nenhuma, distribuindo todo o fluxo de RSD entre os aterros sanitários.

4) Na restrição representada pela eq. (23):

$$\sum_{j=1}^m e_{jkn} \times (1-G) + \sum_{i=1}^m y_{ikn} \leq \text{capat}_{kn}, \text{ para todo } k \text{ e } n \quad (23a)$$

onde:

MA = parâmetro associado à quantidade de MWh/t de RSD, para aterros sanitários.

RA = parâmetro associado à quantidade de CO₂/t de RSD, para aterros sanitários.

$ctra_{ikn}$ = custo de transporte dos RSD produzidos no Município i ao aterro sanitário localizado no Município k .

Os aterros que poderão ser potenciais receptores de resíduos serão os aterros localizados nos Municípios de Mauá, Santa Isabel, Santos e Tremembé. Todos estes aterros sanitários possuem Atividades de Projetos MDL aprovadas junto à Comissão Interministerial no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (para a conversão de gás de aterro em energia, apenas o aterro de Mauá; para a captura e queima de biogás, todos os demais) (BRASIL, 2011).

Conforme USINA VERDE (2009a), a geração de energia a partir da captura do biogás de aterro fica entre 0,1 a 0,2 MWh. Desta forma, foi considerado o valor médio de 0,15 MWh para a geração de energia a partir da captura do biogás, no aterro de Mauá, por ser o único com atividade de projeto MDL que considera geração de energia.

Henriques (2003) apud Henriques (2004) mostra que para a captura de gás de aterro as emissões evitadas por unidade de geração energética (t CO₂/MWh) são na ordem de 5,87 e a quantidade de RSD para cada unidade de geração energética (t RSD/MWh) seria 4,2. Então, a quantidade de emissões evitadas por tonelada de RSD processada na usina (t CO₂/ t RSD), seria de aproximadamente 1,4.

O custo de operação de aterro considerado leva em conta o custo de disposição final dos RSD atualmente pagos pelos Municípios da Região Metropolitana da Baixada Santista e do Litoral Norte. Estes valores foram obtidos através da pesquisa realizada junto às Prefeituras destes Municípios. Como nem todas forneceram esta informação, supôs-se que todos os aterros cobram o valor do R\$ 65,00/t de RSD depositado no aterro, valor próximo ao pago pelas Prefeituras que informaram.

Para este cenário, todos os demais parâmetros foram considerados como sendo os mesmos que os utilizados no Cenário 1.

3.5.4 Cenário 4

Neste cenário, a única diferença em relação ao modelo apresentado no cenário 3 é o parâmetro de quantidade de resíduos produzida em cada Município, onde são descontados os materiais recicláveis por meio da composição gravimétrica²² de RSD de cada Município.

A mais recente análise da composição gravimétrica dos RSD, em Itanhaém, foi realizada em 2004, como pode ser visualizada através da Tabela 15.

Tabela 15 – Composição Gravimétrica do RSD no Município de Itanhaém, 2004

Componente	%
Matéria Orgânica	74,8
Plásticos	9,9
Papel	5,4
Couro/Tecido/Borracha	2,6
Vidro	2,3
Entulho	1,9
Metais	1,8
Madeira	1,1
Outros	0,2

Fonte: Itanhaém (2010).

A matéria orgânica representa quase 75% do peso total dos resíduos, sendo que o peso de materiais recicláveis como plástico, vidro e papel correspondem a 17,6%.

A composição gravimétrica dos RSD no Município de Peruíbe é apresentada na Tabela 16.

²² Mostra o percentual de cada componente em relação ao peso total dos resíduos.

Tabela 16 – Composição Gravimétrica do RSD no Município de Peruíbe

Componente	%
Matéria Orgânica	49
Plásticos	19
Papel	9
Tapos em geral	7
Vidro	3
Louças	2
Metais	3
Madeira	6
Outros	2

Fonte: SÃO PAULO (2010b).

Na composição gravimétrica obtida através dos dados da Prefeitura Municipal de Peruíbe, nota-se que menos da metade do peso dos resíduos é composto por matéria orgânica, havendo uma boa participação de plásticos (quase 20%) (SÃO PAULO, 2010b).

A composição gravimétrica dos resíduos no Município de Santos é apresentada na Tabela 17.

Tabela 17 – Composição Gravimétrica do RSD no Município de Santos

Componente	%
Matéria Orgânica	41,96
Papel	16,41
Plásticos	13,59
Tecidos	4,67
Vidro	4,1
Metal	3,37
Solo/rochas	2,9
Borracha	1,72
Tetra Pack	1,52
Madeira	1,07
Outros	8,68

Fonte: SÃO PAULO (2010c).

A composição gravimétrica do Município de Santos é mais diversificada que as composições apresentadas através das Tabelas 15 e 16. A matéria orgânica representa apenas 41,96% do peso total dos resíduos e, dos componentes restantes, possuem destaque o papel com 16,41% e os plásticos com 13,59%.

Os demais Municípios não possuem composição gravimétrica própria dos RSD, sendo adotada a mesma composição gravimétrica apresentada para o Município de Santos, para os Municípios que possuem mais do que 100.000 habitantes, a composição gravimétrica do Município de Itanhaém para os Municípios com população entre 50.000 e 100.000 habitantes, e a do Município de Peruíbe para os Municípios com população inferior a 50.000 habitantes.

Sendo assim, o montante de RSD destinado para a usina de incineração ou aterros sanitários levando em conta que os principais materiais recicláveis (papel, plástico, vidro e metal) foram retirados da geração total de RSD de cada Município, é apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Quantidade de RSD gerados, excluídos os materiais recicláveis

Município	Qtde t/dia (Meses de Baixa Temporada)	Qtde t/dia (Meses de Alta Temporada)
Bertioga	50,754	88,836
Caraguatatuba	77,4969	161,2
Cubatão	56,303	56,303
Guarujá	112,728	225,456
Ilhabela	27,2382	125,4
Itanhaém	52,39	157,17
Mongaguá	45,672	60,918
Peruíbe	45,54	91,08
Praia Grande	211,06	633,18
Santos	351,97	422,12
São Sebastião	23,5352	47,0704
São Vicente	262,3	301,34
Ubatuba	49,569	186,0248
Total	1.366,5563	2.556,0982

Fonte: elaboração própria.

Entretanto, o uso da composição gravimétrica torna este cenário otimista, já que, atualmente, a maioria dos municípios pesquisados não monitora com precisão a quantidade coletada seletivamente, apesar da existência de programas voltados para este sentido. E dos que acompanham, a coleta seletiva gira em torno de 1 a 2% do total de resíduos coletados.

A melhor situação de encontra no Município de Ilhabela, onde estima-se que do total de RSD coletados, ou seja 24.482 t/ano, 12.877 t/ano representem resíduos não reaproveitáveis,

3.466 t/ano são recuperados no Centro de Triagem e 8.139 t/ano passam pelo processo de compostagem (SÃO PAULO, 2011).

Mesmo com esta realidade, estabelecer um cenário considerando a coleta seletiva por parte dos Municípios se apresenta de maneira fundamental pois, conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a coleta seletiva é uma das prioridades no que se refere ao gerenciamento de RSD (BRASIL, 2010).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Cenário 1

Este cenário considera a modelagem matemática original apresentada na seção 3.3.3, desconsiderando apenas o uso das escórias e cinzas para a construção civil, já que não foi possível estimar a demanda por tal insumo na região. Os estudos da Usina Verde sobre a utilização deste material ainda se encontram em fase experimental, não sendo ainda disponibilizado para o mercado.

O objetivo desta configuração se refere à maximização o lucro do processo de incineração, levando em conta a receita auferida com energia elétrica e créditos de carbono e os custos logísticos (logística rodoviária e custos operacionais), a partir da localização ótima de uma única usina de incineração com recuperação energética.

A solução do problema apontou o Município de Santos como a melhor alternativa para a localização da usina, oferecendo um lucro de R\$ 3.623,71 a partir dos parâmetros considerados. A receita estimada é de aproximadamente R\$ 545.850,00 e os custos aproximadamente, R\$ 542.220,00. Lembrando que os custos levam em conta não apenas os custos operacionais da usina mas também os custos de transporte dos RSD, a partir dos Municípios, os custos de transporte das escórias e cinzas da usina para os aterros sanitários e os custos com a disposição final das mesmas. Portanto, mesmo considerando todos estes custos logísticos, o processo de incineração consegue se alimentar e ainda apresentar saldo final positivo.

Os Municípios atendidos pela usina se encontram no entorno do Município de Santos, conforme é apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 – Municípios e quantidades (em toneladas) enviadas à usina de incineração localizada no Município de Santos, conforme Cenário 1

Município	Baixa Temporada	Alta Temporada
Guarujá	184,8	14
Praia Grande	8,2	0
Santos	577	692
São Vicente	430	494

Fonte: resultados da pesquisa.

Os Municípios de Santos e São Vicente seriam totalmente atendidos pela usina, tanto na configuração de baixa como de alta temporada, sendo o restante da capacidade da usina alocada entre os Municípios de Guarujá e Praia Grande. Destes dois Municípios, apenas Guarujá é plenamente atendido na configuração de baixa temporada, talvez não sendo interessante a usina atender o Município de Praia Grande, devido ao valor insignificante de 8,2 t de RSD em relação ao total produzido diariamente pelo Município (346 t de RSD). A Figura 7 permite uma melhor visualização do fluxo de resíduos provenientes dos Municípios para a usina de incineração localizada em Santos.

As escórias e cinzas seriam atendidas pelo aterro sanitário localizado no Município de Santos.

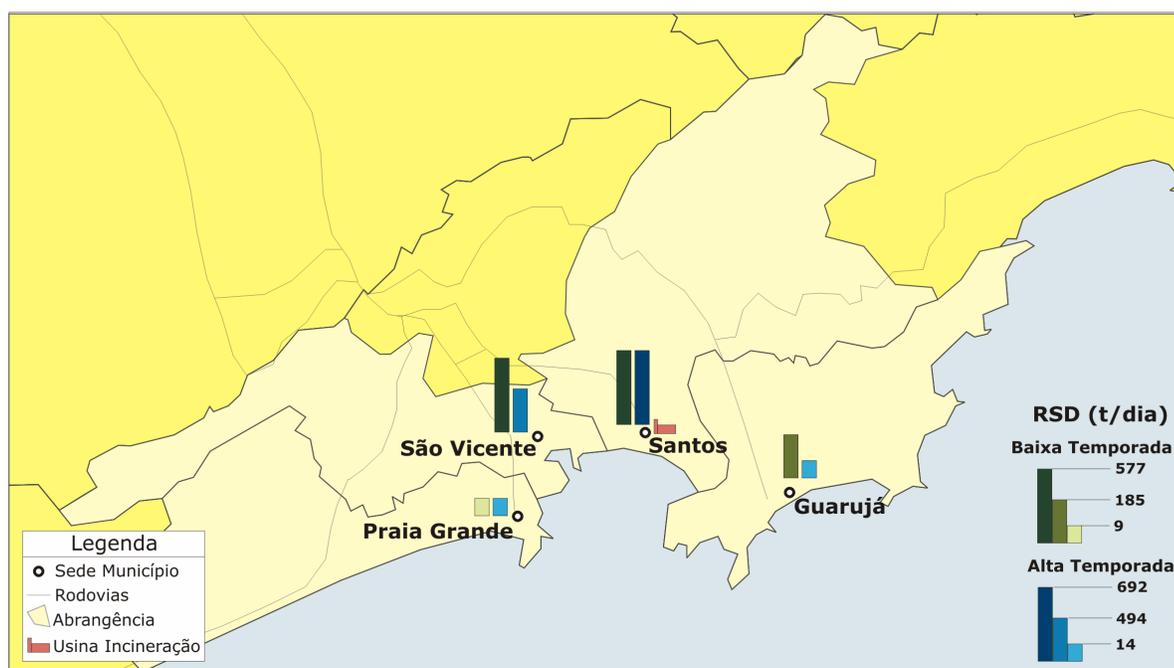


Figura 7 – Fluxo de resíduos proveniente dos Municípios à usina de incineração para o Cenário 1

Fonte: elaborado por Gismaps Sistemas a partir dos resultados da pesquisa.

4.2 Cenário 2

Este cenário considerou a mesma modelagem matemática apresentada no cenário 1 e utilizou os mesmos parâmetros, mas estabeleceu um *ranking* das melhores alternativas para a localização ótima da usina: vai se descartando a solução ótima apresentada anteriormente até se chegar ao último Município escolhido dentre todos.

Conforme apresentado no Cenário 1, a melhor localização da usina seria no Município de Santos. A segunda melhor alternativa, então, apresentada pelo modelo, seria o Município de São Vicente. O lucro proporcionado por esta alternativa seria de R\$ 1.875, 91, onde a receita estimada seria de aproximadamente R\$ 545.850,00 e o custo obtido de aproximadamente R\$ 543.970,00.

Como a receita permanece a mesma, a redução no lucro se deve apenas ao aumento associado ao custo. Isso pode ser explicado pelo fato de, no modelo, a usina atender sempre a 1.200 t/dia; como a receita está diretamente relacionada à quantidade de RSD incinerada, esta apresentará o mesmo valor, não importando a localização da usina de incineração.

Já os custos dependem da distância entre os Municípios geradores e o Município onde está localizada a usina, bem como a distância da usina para os aterros sanitários que irão receber as escórias e cinzas.

O custo associado à disposição final das escórias e cinzas é o mesmo entre os aterros sanitários, e estas, nesta modelagem, sempre serão 120 t/dia, por corresponder a 10% dos RSD incinerados, de maneira que o fato que determinará as variações no custo relacionado ao envio de escórias e cinzas aos aterros sanitários será somente o custo de transporte.

Desta forma, quanto mais dispersos ficarem os Municípios, maiores serão os custos associados ao transporte de RSD e de escórias e cinzas.

Neste caso, em particular, esse aumento ocorreu devido ao aumento do custo de transporte e disposição das escórias e cinzas, que passaria de R\$ 16.140,00, para a localização da usina em Santos, para R\$ 19.380,00 para a localização em São Vicente.

Na direção oposta, o custo com transporte de RSD dos Municípios para a usina e de operação caiu de R\$ 526.080,00 para R\$ 524.590,00.

Para a localização da usina em São Vicente, os Municípios atendidos pela usina seriam o próprio Município de São Vicente, Praia Grande e Santos (Tabela 20).

Tabela 20 – Municípios e quantidades (em toneladas) enviadas à usina de incineração localizada no Município de São Vicente, conforme *ranking* do Cenário 2

Município	Baixa Temporada	Alta Temporada
Praia Grande	346	706
Santos	424	0
São Vicente	430	494

Fonte: resultados da pesquisa

Percebe-se que o Município de São Vicente seria plenamente atendido nas duas temporadas, o Município de Praia Grande seria totalmente atendido na configuração de baixa temporada e na de alta temporada seria atendido em quase 70% do volume diário de RSD gerados. Já o Município de Santos enviaria quase 75% dos RSD produzidos diariamente na baixa temporada para a usina e nada na época de alta temporada.

A partir de São Vicente, as escórias e cinzas seriam enviadas para o aterro localizado no Município de Santos.

Na terceira posição do *ranking* aparece o Município de Praia Grande, onde o lucro do processo de incineração seria correspondente a R\$ 39,91. Nesta solução, o custo do processo de incineração aumentaria para R\$ 545.810,00. Este aumento no custo, como na solução anterior, também foi associado ao custo de transporte de escórias e cinzas para o aterro sanitário, que aumentaria em R\$ 2.160,00, já que o custo com o transporte de resíduos até a usina seria reduzido em R\$ 320,00.

Os Municípios atendidos pela usina localizada em Praia Grande seriam os mesmos da segunda posição no *ranking*, São Vicente, sofrendo alteração apenas as quantidades de RSD provenientes de cada Município para a usina em Praia Grande, conforme mostra a Tabela 21.

Tabela 21 – Municípios e quantidades (em toneladas) enviadas à usina de incineração localizada no Município de Praia Grande, conforme *ranking* do Cenário 2

Município	Baixa Temporada	Alta Temporada
Praia Grande	346	1038
Santos	424	0
São Vicente	430	162

Fonte: resultados da pesquisa

O Município de Praia Grande seria, então, plenamente atendido pela usina; o Município de São Vicente seria atendido plenamente apenas na configuração de baixa temporada e o Município de Santos seria atendido de maneira equivalente à apresentada pela solução anterior.

Mais uma vez, as escórias e cinzas seriam dispostas no aterro localizado no Município de Santos.

O quarto Município escolhido pela solução ótima do modelo seria o Município de Guarujá. A partir desta posição no *ranking*, o processo de incineração começa a apresentar prejuízo, sendo no caso um montante de R\$ 25.380,00. Em comparação com a solução ótima onde Praia Grande foi o Município escolhido para receber a usina, o custo com a usina de incineração aumentaria de R\$ 524.270 para R\$ 550.230. Já o custo com o transporte das escórias e cinzas no aterro sanitário cairia R\$ 540,00, diferentemente das soluções anteriores, onde o custo com transporte de resíduos para a usina e de incineração estava caindo e o custo de transporte e disposição de escórias e cinzas estava se elevando.

Tanto o Município de Guarujá quanto o Município de Santos seriam totalmente atendidos pela usina, sendo o Município de São Vicente totalmente atendido apenas em baixa temporada. O Município de Praia Grande enviaria seus RSD apenas em baixa temporada e mesmo assim em quantidade não representativa (Tabela 22).

Tabela 22 – Municípios e quantidades (em toneladas) enviadas à usina de incineração localizada no Município de Guarujá, conforme *ranking* do Cenário 2

Município	Baixa Temporada	Alta Temporada
Guarujá	184,8	369,6
Praia Grande	8,2	0
Santos	577	692
São Vicente	430	138,4

Fonte: resultados da pesquisa

O aterro sanitário localizado no Município de Santos seria a melhor opção para a recepção das escórias e cinzas.

Na sequência, o *ranking* continuou a ser analisado, mas observou-se que em todas as demais escolhas a função objetivo apresentou prejuízo, optou-se por consolidar todos os dados no Quadro 1, ao invés de se comentar cada solução como estava sendo feito até então.

Localização Ótima da Usina	Função Objetivo	Municípios	Aterro para envio de escórias e cinzas
Santos	R\$ 3.623,71	Guarujá, Praia Grande, Santos e São Vicente	Santos
São Vicente	R\$ 1.875,91	Praia Grande, Santos e São Vicente	Santos
Praia Grande	R\$ 39,91	Praia Grande, Santos e São Vicente	Santos
Guarujá	-R\$ 25.380,00	Guarujá, Praia Grande, Santos e São Vicente	Santos
Cubatão	-R\$ 43.880,00	Cubatão, Praia Grande, Santos e São Vicente	Santos
Mongaguá	-R\$ 93.679,91	Cubatão, Itanhaém, Mongaguá, Praia Grande, Santos e São Vicente	Santos e Santa Isabel
São Sebastião	-R\$ 105.251,00	Caraguatatuba, Cubatão, Guarujá, Ilhabela, Santos, São Sebastião e São Vicente	Santos
Ilhabela	-R\$ 112.772,47	Caraguatatuba, Cubatão, Guarujá, Ilhabela, Santos, São Sebastião e São Vicente	Santos
Caraguatatuba	-R\$ 115.486,12	Bertioga, Caraguatatuba, Cubatão, Guarujá, Ilhabela, Santos, São Sebastião e São Vicente	Tremembé
Bertioga	-R\$ 122.722,74	Bertioga, Caraguatatuba, Cubatão, Guarujá, Peruíbe, Santos, São Vicente e Ubatuba	Tremembé
Itanhaém	-R\$ 137.218,18	Ilhabela, Itanhaém, Mongaguá, Peruíbe, Praia Grande, Santos, São Sebastião, São Vicente	Santos e Santa Isabel

(continua)

Quadro 1 – Ranking para escolha ótima da localização da usina de incineração

Ubatuba	-R\$ 159.782,01	Bertioga, Caraguatatuba, Cubatão, Guarujá, Santos, São Vicente e Ubatuba	Santa Isabel e Mauá
Peruíbe	-R\$ 173.945,50	Bertioga, Caraguatatuba, Ihabela, Itanhaém, Mongaguá, Peruíbe, Praia Grande, São Sebastião, São Vicente	Mauá

(conclusão)

Quadro 1 – *Ranking* para escolha ótima da localização da usina de incineração
 Fonte: resultados da pesquisa

Percebe-se através do Quadro 1, que apenas as três primeiras escolhas ofereceriam retorno positivo, considerando apenas o processo de incineração, as quais seriam Santos, São Vicente e Praia Grande. Estes Municípios aparecem em quase todas as escolhas como ofertantes de RSD para a usina. O aterro sanitário localizado no Município de Santos aparece na maioria das escolhas como receptor para as escórias e cinzas produzidas pela usina.

4.3 Cenário 3

No cenário 3 é considerado o uso de disposição final dos RSD em aterros sanitários como alternativa ao uso da incineração com recuperação energética. O objetivo de se utilizar este cenário seria verificar se mesmo com a possibilidade de se enviar os resíduos para aterros sanitários, o modelo ainda escolheria implantar a usina de incineração.

A solução do modelo para este cenário alternativo apontou o Município de Praia Grande como localização ótima para a instalação da usina de incineração, os aterros localizados em Santos, Mauá e Tremembé para receber os RSD não enviados para a usina de incineração e para a recepção das escórias e cinzas proveniente do processo de incineração dos RSD, os aterros localizados em Santos e em Santa Isabel.

O valor da função objetivo para este cenário apresentou um prejuízo de R\$163.790,47. Este valor é composto pelas receitas com o processo de incineração e com a disposição final em aterros sanitários e pelos custos inerentes a ambas as alternativas.

A receita com o processo de incineração foi de R\$ 545.850,00, valor já apresentado anteriormente. A receita gerada pelo envio dos RSD ao aterro localizado em Santos seria de R\$ 79.344,61, ao aterro de Mauá seria de R\$ 146.670,00 e ao aterro de Tremembé R\$ 5.457,22. Desta maneira, a receita total gerada, considerando as duas tecnologias, seria de R\$ 777.321,83.

O custo com o processo de incineração, considerando tanto o custo com transporte de RSD dos Municípios até a usina e custos operacionais, seria de R\$ 532.990,00.

O custo com os aterros considera os custos de transporte e de disposição final dos RSD provenientes dos Municípios e das escórias e cinzas provenientes da usina de incineração.

O custo do transporte e disposição final dos RSD proveniente diretamente dos Municípios com o aterro localizado em Santos seria de R\$ 143.400,00, o custo com o aterro em Mauá seria de R\$ 222.330,00 e o custo com o aterro localizado em Tremembé seria de R\$ 17.955,64.

O custo com o transporte e disposição final das escórias e cinzas proveniente da usina de incineração seria de R\$ 10.770,00 no aterro em Santos e de R\$ 13.656,00 no aterro em Santa Isabel.

Neste cenário, o Município de Praia Grande seria o único que enviaria para a usina de incineração a totalidade dos resíduos gerados, tanto em baixa como em alta temporada, conforme apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 – Municípios e quantidades (em toneladas) enviadas à usina de incineração localizada no Município de Praia Grande, conforme Cenário 3

Município	Baixa Temporada	Alta Temporada
Bertioga	76,9	0
Cubatão	92,3	0
Guarujá	184,8	0
Mongaguá	69,2	0
Praia Grande	346	1038
Santos	0,8	0
São Vicente	430	162

Fonte: resultados da pesquisa

Os Municípios de Bertioga, Cubatão, Guarujá e Mongaguá enviariam a totalidade de RSD gerados em baixa temporada e não enviariam nada para a usina de incineração em alta temporada. O Município de Santos enviaria apenas 0,8 t/dia em baixa temporada e nada em alta temporada. O Município de São Vicente enviaria toda produção diária em baixa temporada e em

torno de 33% em alta temporada. A Figura 8 permite uma melhor visualização do fluxo de resíduos provenientes dos Municípios para a usina de incineração localizada em Praia Grande.

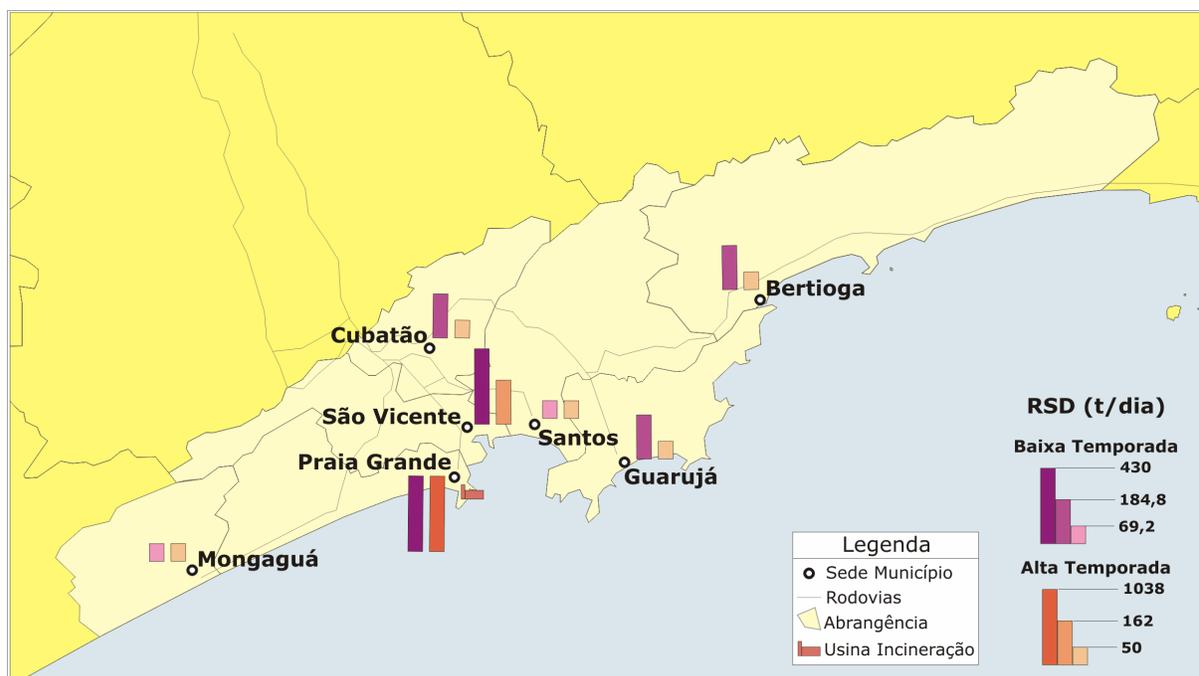


Figura 8 - Fluxo de resíduos proveniente dos Municípios à usina de incineração para o Cenário 3

Fonte: elaborado por Gismaps Sistemas a partir dos resultados da pesquisa.

As escórias e cinzas provenientes da usina de incineração seriam enviadas em baixa temporada para o aterro sanitário localizado em Santos e em alta temporada para o aterro sanitário localizado em Santa Isabel.

A porção de RSD não enviada para a usina de incineração seria enviada para os aterros sanitários localizados nos Municípios de Mauá, Santos e Tremembé. Dos 13 Municípios analisados, 9 Municípios enviariam RSD diretamente para o aterro sanitário localizado no Município de Mauá, totalizando 362,12 t/dia em baixa temporada e 1.209,6 t/dia em alta temporada (Tabela 24).

Tabela 24 – Fluxo de RSD diretamente dos Municípios aos aterros sanitários, conforme Cenário 3

Município	Aterro Sanitário	Baixa Temporada	Alta Temporada
Caraguatatuba		96,15	200
Cubatão		0	92,3
Ilhabela		41,27	190
Itanhaém		65	195
Mongaguá	Mauá	0	92,3
Peruíbe		69	138
São Sebastião		29,2	58,4
Ubatuba		61,5	230,8
São Vicente		0	12,8
Guarujá		0	369,6
Santos	Santos	576,2	692
São Vicente		0	319,2
Bertioga	Tremembé	0	134,6

Fonte: resultados da pesquisa

A Figura 9 ilustra o fluxo de resíduos proveniente dos Municípios diretamente aos aterros sanitários, a partir dos resultados apresentados no Cenário 3.



Figura 9 – Fluxo de resíduos enviados diretamente aos aterros sanitários para o cenário 3

Fonte: elaborado por Gismaps Sistemas a partir dos resultados da pesquisa.

O aterro localizado em Santos receberia RSD diretamente dos Municípios de Guarujá, Santos e São Vicente, na faixa de 576,2 t/dia em baixa temporada (somente do próprio Município de Santos) e de 1.380,8 t/dia em alta temporada.

O aterro sanitário localizado em Tremembé receberia 134,6 t/dia de RSD apenas do Município de Bertioga, somente em alta temporada.

4.4 Cenário 4

No Cenário 4 são avaliadas os mesmos elementos do Cenário 3, diferindo apenas no montante de geração de RSD de cada Município, considerando que são descontados os materiais recicláveis, conforme a composição gravimétrica dos Municípios.

A solução do modelo para este cenário alternativo indicou o Município de São Vicente para a instalação da usina de incineração de RSD com recuperação energética, indicando também os aterros localizados nos Municípios de Mauá, Santos e Tremembé para recepção dos RSD não enviados à usina de incineração. Para a disposição final das escórias e cinzas do processo de incineração foi indicado, desta vez, apenas o aterro sanitário localizado no Município de Santos.

O valor da função objetivo apresentou o valor de - R\$ 87.233,84, uma melhora de quase 50% em relação ao prejuízo apresentado no cenário anterior.

A receita com o processo de incineração, como anteriormente visto, seria de R\$ 545.850,00. A receita gerada pelo envio dos RSD ao aterro localizado em Santos seria de R\$ 17.961,56, ao aterro de Mauá seria de R\$ 92.457,86 e ao aterro de Tremembé R\$ 3.601,77.

O custo com o processo de incineração, considerando tanto o custo com transporte de RSD dos Municípios até a usina e custos operacionais, seria de R\$ 547.870,00. O custo com o transporte e disposição final das escórias e cinzas provenientes da usina de incineração no aterro sanitário localizado em Santos seria de R\$ 19.380,00.

O custo do transporte e disposição final dos RSD provenientes diretamente dos Municípios com o aterro localizado em Santos seria de R\$ 30.215,8, o custo com o aterro em Mauá seria de R\$ 137.790,00, e o custo com o aterro localizado em Tremembé seria de R\$ 11.850,72.

Os Municípios de Bertioga, Cubatão, Ilhabela, Itanhaém, Santos e São Sebastião enviariam toda a quantidade gerada de RSD descontada dos materiais recicláveis, em baixa temporada, e não enviariam nada para a usina em alta temporada, conforme ilustra a Tabela 25.

O Município de Guarujá enviaria toda a geração diária de RSD descontada dos materiais recicláveis em época de baixa temporada e cerca de 90% em alta temporada.

Tabela 25 – Municípios e quantidades (em toneladas) enviadas à usina de incineração localizada no Município de São Vicente, conforme Cenário 4

Município	Baixa Temporada	Alta Temporada
Bertioga	50,75	0
Caraguatatuba	6,04	0
Cubatão	56,3	0
Guarujá	112,7	204,56
Ilhabela	27,24	0
Itanhaém	52,39	0
Mongaguá	45,67	60,92
Praia Grande	211,06	633,18
Santos	351,97	0
São Sebastião	23,54	0
São Vicente	262,3	301,34

Fonte: resultados da pesquisa

Já os Municípios de Mongaguá, Praia Grande e São Vicente enviariam toda a geração diária de RSD descontada dos materiais recicláveis tanto em baixa como em alta temporada.

A Figura 10 ilustra o fluxo de resíduos proveniente dos Municípios para a usina de incineração, localizada em Praia Grande, a partir dos resultados apresentados no Cenário 4.

As escórias e cinzas seriam enviadas apenas para o aterro sanitário localizado no Município de Santos.

Como neste cenário a quantidade de RSD é menor, foi reduzida a quantidade enviada aos aterros, pois a solução do modelo apontou para a implantação da usina com capacidade para 1.200 t/dia.

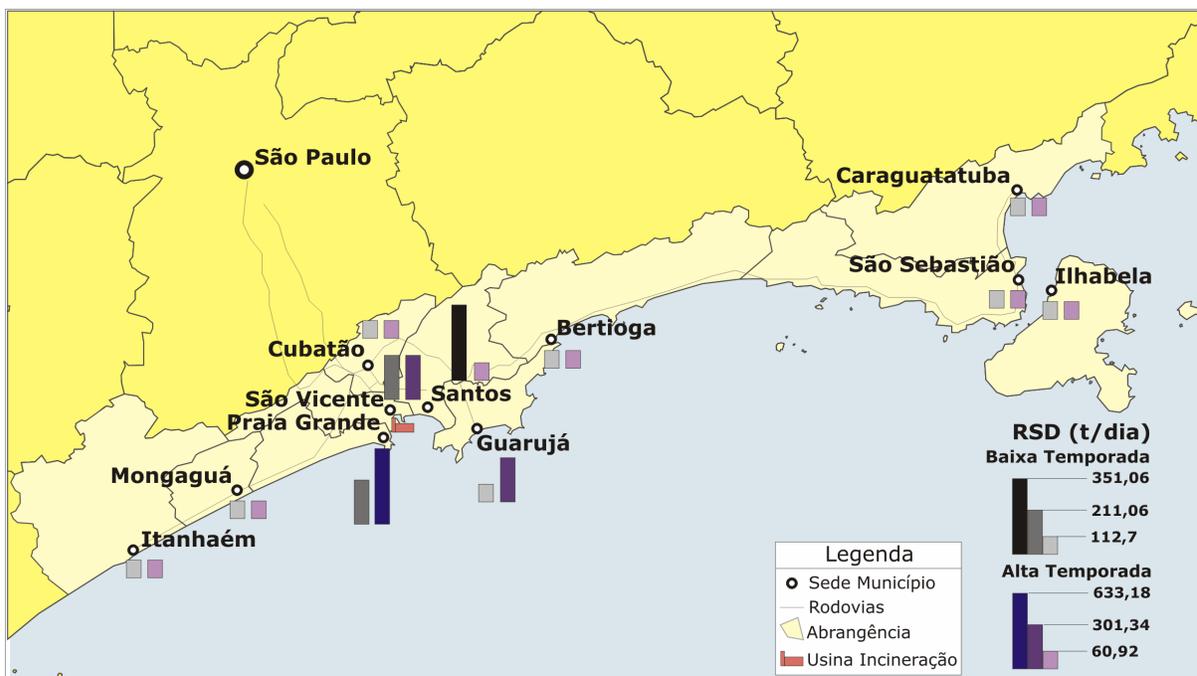


Figura 10 – Fluxo de resíduos proveniente dos Municípios à usina de incineração para o Cenário 4

Fonte: resultados da pesquisa, elaborado por Gismaps Sistemas.

De acordo com a Tabela 26, o aterro localizado no Município de Mauá atenderia a 7 Municípios, sendo que em baixa temporada receberia 166,56 t/dia dos Municípios de Caraguatatuba, Peruíbe e Ubatuba. Em alta temporada, receberia o equivalente a 824, 24 t/dia de RSD.

O aterro sanitário localizado no Município de Santos receberia RSD dos Municípios de Guarujá e Santos, somente em alta temporada, cerca de 440 t/dia.

O aterro sanitário localizado em Tremembé receberia 88,84 t/dia de RSD apenas em alta temporada do Município de Bertioga.

Tabela 26 – Fluxo de RSD diretamente dos Municípios aos aterros sanitários, conforme cenário 4

Município	Aterro Sanitário	Baixa Temporada	Alta Temporada
Caraguatatuba		71,46	161,2
Cubatão		0	56,3
Ilhabela		0	125,4
Itanhaém	Mauá	0	157,17
Peruíbe		45,54	91,08
São Sebastião		0	47,07
Ubatuba		49,56	186,02
Guarujá	Santos	0	20,89
Santos		0	422,12
Bertioga	Tremembé	0	88,84

Fonte: resultados da pesquisa

A Figura 11 ilustra o fluxo de resíduos proveniente dos Municípios diretamente aos aterros sanitários, a partir dos resultados apresentados no Cenário 4.

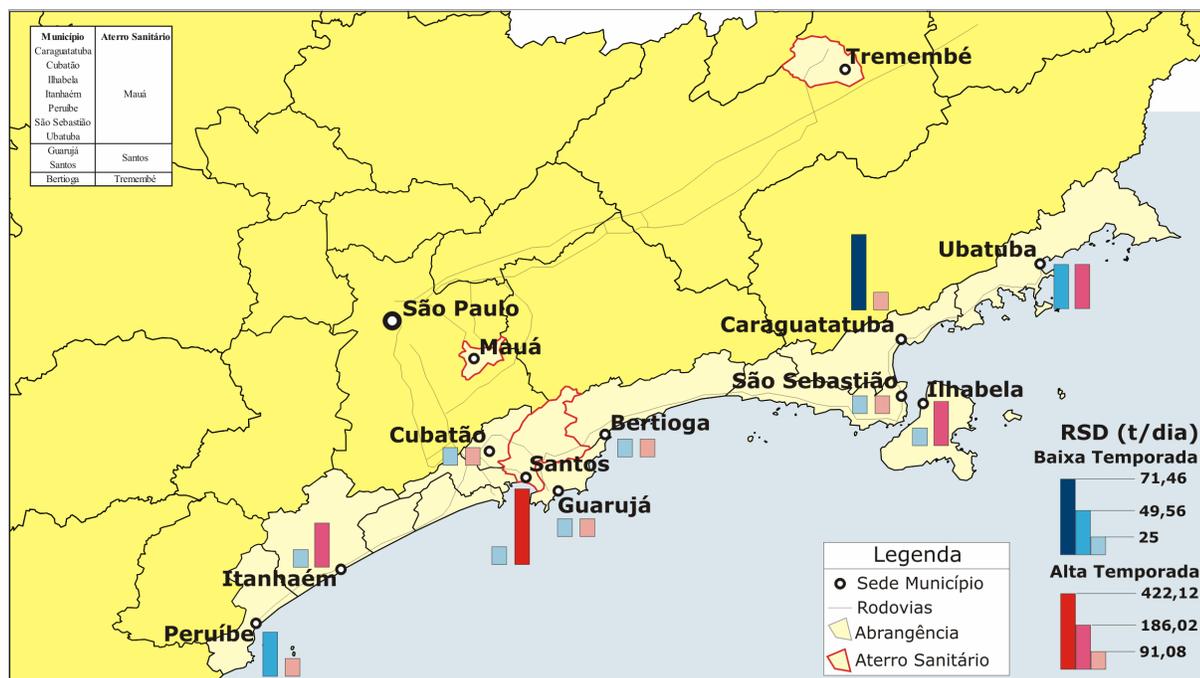


Figura 11 - Fluxo de resíduos enviados diretamente aos aterros sanitários para o cenário 4

Fonte: elaborado por Gismaps Sistemas a partir dos resultados da pesquisa.

4.5 Consolidação dos resultados

De maneira geral, percebeu-se nos cenários apresentados que a localização ótima da usina deveria manter-se próxima dos grandes produtores de RSD, dos Municípios mais populosos da região. Isto pode ser explicado por ser dada grande importância aos custos logísticos na modelagem.

No Quadro 2, consolidou-se os principais resultados dos Cenários 1, 3 e 4, de onde se confirma que as escolhas ótimas se concentram nos Municípios mais populosos da Região.

Principais Resultados	Cenário 1	Cenário 3	Cenário 4
Localização Ótima da Usina	Santos	Praia Grande	São Vicente
Receita com o processo de incineração	R\$ 545.850,00	R\$ 545.850,00	R\$ 545.850,00
Custo com o processo de incineração	R\$ 526.080,00	R\$ 532.990,00	R\$ 547.870,00
Custo com o envio e disposição de escórias e cinzas nos aterros	R\$ 16.140,00	R\$ 24.426,00	R\$ 19.380,00
Receita com o uso de aterros sanitários	-	R\$ 231.471,83	R\$ 114.021,19
Custo com o uso de aterros sanitário	-	R\$ 383.685,64	R\$ 179.856,52
Municípios que enviarão RSD para a Usina	Guarujá, Praia Grande, Santos e São Vicente	Bertioga, Cubatão, Guarujá, Mongaguá, Praia Grande, Santos e São Vicente	Bertioga, Caraguatatuba, Cubatão, Guarujá, Ilhabela, Itanhaém, Mongaguá, Praia Grande, Santos, São Sebastião e São Vicente

(continua)

Quadro 2 – Consolidação dos Cenários 1, 3 e 4.

Municípios que enviariam RSD diretamente aos aterros	-	Todos	Bertioga, Caraguatatuba, Cubatão, Guarujá, Ilhabela, Itanhaém, Peruíbe, Santos, São Sebastião e Ubatuba
Aterros receptores de RSD	-	Santos, Mauá e Tremembé	Santos, Mauá e Tremembé
Aterros receptores de Escórias e Cinzas	Santos	Santos, Santa Isabel	Santos

(conclusão)

Quadro 2 – Consolidação dos Cenários 1, 3 e 4.

Fonte: resultados da pesquisa

5 CONCLUSÕES

As Regiões Metropolitanas do Estado de São Paulo vêm enfrentando dificuldades no que se refere à destinação adequada dos Resíduos Sólidos Domiciliares – RSD; os aterros sanitários que recebem os resíduos gerados pelos Municípios integrantes destas regiões logo não conseguirão mais atender a essa oferta de resíduos e a escassez de áreas ambientalmente adequadas descarta a possibilidade de instalação de novos aterros sanitários.

Uma solução que vem sendo analisada pelo Governo do Estado de São Paulo se refere à instalação de usinas de incineração de resíduos com recuperação energética nestas regiões. Esta tecnologia apresenta como vantagens: a geração de energia; a capacidade de redução do volume de resíduos em até 90% do volume original; o moderno sistema de tratamento de gases, que faz com que seja considerada uma tecnologia limpa, podendo ser instalada até mesmo em centros urbanos. Entretanto, ainda é cara se comparada aos aterros sanitários. Desta maneira, torna-se fundamental um estudo minucioso que aborde vários aspectos de interesse para a instalação de uma tecnologia como esta para evitar e/ou minimizar as implicações de possíveis erros de decisão.

Como a localização de uma unidade industrial se apresenta como um importante fator estratégico para o sucesso de qualquer atividade, na presente pesquisa foi então proposta uma estrutura de modelagem matemática para a localização ótima de unidades de tratamento térmico de resíduos, com o intuito de servir de apoio à tomada de decisão por parte de agentes públicos.

O ferramental utilizado foi o método de programação inteira mista, tendo-se como objetivo maximizar o lucro do processo de incineração como um todo, considerando as receitas com a geração de energia, venda de créditos de carbono e possível uso das escórias e cinzas na construção civil, assim como os custos do envio dos RSD para a usina de incineração, os custos operacionais e os custos de envio e disposição final das escórias e cinzas nos aterros sanitários. Cabe destacar as limitações do modelo, principalmente, pela não consideração de custos da terra para a implantação da usina nas diferentes localidades, considerar o preço da energia elétrica igual para todos os Municípios e considerar apenas a energia elétrica e os créditos de carbono como produtos da usina de incineração de resíduos.

Foram especificados quatro cenários, sendo que um deles serviu apenas para elencar um *ranking* de soluções ótimas, não diferindo estruturalmente do cenário - base. Desta forma, podem ser inferidas algumas conclusões com base nos resultados apresentados pelos cenários propostos.

Em primeiro lugar, a localização ótima da usina foi apontada para o entorno dos Municípios de Santos, Praia Grande e São Vicente, sendo estas as localidades apontadas pela solução ótima dos cenários 1, 3 e 4, respectivamente. Se for levado em consideração o *ranking* obtido no cenário 2, verifica-se que os três municípios também aparecem nas primeiras colocações.

Conclui-se que mesmo com a usina de incineração apresentando custos operacionais significativamente maiores que os custos operacionais dos aterros sanitários, as receitas geradas no processo de incineração a viabilizam como alternativa para o tratamento de resíduos.

A proximidade do aterro sanitário localizado no Município de Santos (fator que minimiza os custos com transporte) faz com que o mesmo seja por várias vezes escolhido para a recepção das escórias e cinzas provenientes da usina de incineração.

No cenário 4, os custos do uso do processo de incineração aumentaram, pois como a quantidade de resíduos enviada para a usina se reduziu, devido à coleta seletiva, para atender à sua capacidade, Municípios mais distantes enviariam os resíduos gerados, como pode ser verificado no Quadro 2.

Nestes Municípios a coleta seletiva é realizada em 1 a 2% do total de resíduos gerados, muito longe da porção de materiais recicláveis presente na composição gravimétrica destes Municípios, que fica em torno de 20%. Cabe, então, a intensificação das campanhas de conscientização da população quanto à separação dos resíduos recicláveis de forma adequada, maior alocação de recursos para a coleta seletiva, além do fomento às cooperativas de catadores de materiais recicláveis.

A modelagem abordada considerou o poder público como gestor do processo de incineração de resíduos em sua totalidade. Isso requer que sejam bem definidas responsabilidades de cada agente envolvido (sejam estes agentes das esferas municipais, estaduais ou federais) para que a gestão integrada da disposição final entre os Municípios seja operada eficientemente, de modo que a instalação da usina de incineração seja capaz de atender às necessidades a que veio suprir.

Ficam como sugestões para trabalhos futuros pesquisas sobre: as características técnicas e outros produtos que a usina de incineração possa gerar; a aplicação do modelo em regiões mais densamente habitadas, onde seja interessante a análise dos custos da terra para a implantação da usina; a consideração de variações no preço da energia elétrica que seja condizente com realidade da usina a ser implantada.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Tarifas residenciais**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=493&idPerfil=4>. Acesso em: 24 ago. 2011.

ALEMANHA. Federal Ministry for the Environment Nature Conservation and Nuclear Safety. **Waste incineration – a potencial danger?** Alemanha, 2005. 9p.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos**: planejamento, organização e logística empresarial. Tradução de E. Pereira. 4. ed. Porto Alegre: Bookmam, 2001. 532p.

BARTHOLOMEU, D. B.; CAIXETA-FILHO, J. V. (Org.). **Logística ambiental de resíduos sólidos**. São Paulo: Atlas, 2011. 250p.

BHASIN, K. C. **Plasma ARC gasification for waste management**. Electronics for you. Fevereiro, 2009. 123-130p.

BM&FBOVESPA. **Mercado de carbono**. Disponível em: <http://www.bmfbovespa.com.br/pt-br/mercados/mercado-de-carbono/mercado-de-carbono.aspx?idioma=pt-br>. Acesso em: 22 ago. 2011.

BRASIL. Lei N° 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei N° 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Atividades de projetos de MDL aprovados nos termos da Resolução N° 1**. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/57967.html>. Acesso em: 15 ago. 2011.

BRISSON, I.; POWELL, J. C. **The assessment of social costs and benefits of waste disposal**. Centre for Social and Economic Research on the Global Environment. 1994. Disponível em: <http://www.uea.ac.uk/env/cserge/pub/wp/wm/wm_1994_06.pdf>. Acesso em: 12 maio 2010.

CAIXETA-FILHO, J.V. **Pesquisa operacional**: técnicas de otimização aplicadas a sistemas agroindustriais. São Paulo: Atlas, 2001. 171p.

CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Gestão da cadeia de suprimentos**: estratégia, planejamento e operações. Tradução de D. Vieira. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. 520p.

CONFEDERATION OF EUROPEAN WASTE-TO-ENERGY PLANTS – CEWEP. **2008 country reports on waste management**. Disponível em: < http://www.cewep.eu/information/data/subdir/323_Country_Reports_on_Waste_Management.html>. Acesso em: 24 nov. 2010.

DYKGRAAF, E.;VOLLEBERGH, H. Burny or Bury? A social cost comparison of final waste disposal methods. **Ecological Economics**. v. 50, pp. 233-247, 2004. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800904001685>. Acesso em: 06 set. 2009.

_____. Literature review of social costs and benefits of wast disposal and recycling. Environmental Assessment Institute. In: _____. Dinamarca: 2005. chap.5. p. 80-98.

FERRARI, R.C. **Utilização de modelo matemático de otimização para identificação de locais para instalação de unidades armazenadoras de soja no Estado do Mato Grosso**. 2006. 185 p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

FURLAN, W. **Modelo de decisão para escolha de tecnologia para o tratamento de resíduos sólidos no âmbito de um município**. 2007, 240p. Tese (Doutorado em Administração) – Universidade de São Paulo, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade – FEA. São Paulo, 2007.

GANDELINI, L; CAIXETA-FILHO, J. V. Otimização dos aterros sanitários. **Economia Contemporânea**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 3, p. 509-523, 2007.

GUIA QUATRO RODAS RODOVIÁRIO. Disponível em: http://mapas.viajeaquibril.com.br/guiarodoviario/guia_Rodoviario_viajeaquibril.aspx. Acesso em: 07 set. 2011.

HAN, H.; LONG, J.; LI, S.; QIAN, G. **Comparison of green-house gas emission reductions and landfill gas utilization between a landfill system and an incineration system**. Waste Management & Research. v. 28, n. 4, pp. 315-321, 2010. Disponível em: <http://wmr.sagepub.com/cgi/content/abstract/28/4/315> . Acesso: 12 maio 2010.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica**. 2004. 189p. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

ICE FUTURES EUROPE. **ICE product guide: ICE ECX EUA FUTURES**. Disponível em: <https://www.theice.com/productguide/ProductDetails.shtml?specId=197>. Acesso em: 22 ago. 2011.

INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION. **Waste and climate change: ISWA White Paper**. Áustria, 2009. 40p.

ITANHAÉM. **Relatório R4:** proposta do Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico. Itanhaém: Prefeitura do Município de Itanhaém, 2010. 183p.

JAMASB, T.; KIAMIL, H.; NEPAL, R. **Hot issue and burning options in waste management:** a social cost benefit analysis of Waste-to-Energy in UK. Working Paper Version. University of Cambridge. 2008. Disponível em: <<http://www.eprg.group.cam.ac.uk/wp-content/uploads/2008/11/eprg0802.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2010.

LINO, I. C.; PERINOTTO, J. A. J.; CERRI, L.E.S. Implantação de aterros sanitários: comparação de métodos de seleção de áreas. **Geociências**, São Paulo, v.27, n.1, p. 53-62, 2008.

LOPES, R.L. **Suinocultura no estado de Goiás:** aplicação de um modelo de localização. 1997. 95 p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

MARTIN, R. F. **Seminário na FIESP debate aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos.** Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/200/10/24_fiesp.htm> Acesso em: 10 ago. 2010.

MENDES, M. R.; IMURA, H. **Eastern prospect:** municipal solid waste management. 2004. Disponível em: <http://www.earthscan.co.uk/news/printablearticle.asp?sp=&v=5&UAN=17>. Acesso em: 16 jul. 2009.

MIRANDA, M. L.; HALE, B. Waste Not, want not: the private and social costs of waste-to-energy production. **Energy Policy**. v. 25, n. 6, pp. 587-600, 1997. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421597000505>>. Acesso em: 06 set. 2009.

NEGRI, J. C. **Programa de resíduos sólidos urbanos:** modelagem de negócio para implantação de empreendimento de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos no Estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.saneamento.sp.gov.br/crbst_30.html>. Acesso em: 29 jul. 2010.

OLIVEIRA, A.M.K. **Potencial da logística ferroviária para a movimentação de açúcar para exportação no Estado de São Paulo:** recomendações de localização para armazéns intermodais concentradores de carga. 2005. 166 p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

RAMOS, S.Y. **Avaliação da localização de packing-houses no Estado de São Paulo:** o caso da laranja de mesa. 2001. 132 p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Resíduos sólidos e meio ambiente no Estado de São Paulo.** São Paulo: Pini Editora, 1993. 144 p.

_____. Resolução SMA nº 50, de 13 de novembro de 2007. Dispõe sobre o Projeto Ambiental Estratégico Lixo Mínimo e dá providências correlatas.

_____. Resolução Conjunta SMA/SSE nº 49, de 18 de outubro de 2007. Cria grupo de trabalho para propor um programa estadual de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos e outros rejeitos da atividade econômica. Disponível em: < <http://homologa.ambiente.sp.gov.br/consema/convocatoria2/Resolu%E7%E3o%20conjunta%20SSE-SMA%2049-2007.PDF>> Acesso em: 12 ago. 2010

_____. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares 2008**. São Paulo: CETESB, 2009. 183p.

_____. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares 2009**. São Paulo: CETESB, 2010a. 177p.

_____. Secretaria de Saneamento e Energia. **Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico: Peruíbe**. São Paulo, 2010b. 213p.

_____. Secretaria de Saneamento e Energia. **Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico: Santos**. São Paulo, 2010c. 224p.

_____. Secretaria de Saneamento e Energia. **Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico: São Vicente**. São Paulo, 2010d. 214p.

_____. Secretaria de Estado de Saneamento e Recursos Hídricos. Proposta de Plano Integrado de Saneamento Básico no Município de Ilhabela. São Paulo, 2011. 90p

SERENZA, E. **Cooperação inclui incineração de resíduos**. Disponível em: http://www.ambiente.sp.gov.br/destaque/2004/dezembro/14_baviera.htm. Acesso em: 03 jul. 2010.

THEMELIS, N. J. **An overview of the global Waste-To-Energy industry**. 2003. Artigo disponível em: <http://www.earthscan.co.uk/news/printablearticle.asp?sp=&v=1&UAN=111>

USINA VERDE. **O lixo e o meio ambiente: panorama internacional**. 2009a. Disponível em: <http://www.usinaverde.com.br/lixoemeioambiente.php?cod=2152313A-ACA1-D5D1-D9CF-D81528495D55>. Acesso em: 15 jul 2009.

USINA VERDE. **A tecnologia Usina Verde**. 2009b. Disponível em: <http://www.usinaverde.com.br/tecnologia.php?cod=3D1F7E27-42EF-FFE5-BE21-F1D126D77DDD>. Acesso em: 15 de jul de 2009.

VIMIEIRO, G.V. **Tecnologias de tratamento de resíduos de serviços de saúde – ênfase no uso do plasma**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24., 2007. Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABES, 2007. 1 CD-ROM.

XAVIER, C. E. O. ; CANO, C. J. Z. ; CRUZ JR, J. C. ; CAIXETA-FILHO, J. V. **Localização ótima de frigoríficos no Mato Grosso do Sul.** In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 45., 2007, Londrina. **Anais...**, Londrina: SOBER, 2007. p. 103-120.

ZUCCHI, J. D. **Modelo locacional dinâmico para a cadeia agroindustrial da carne bovina brasileira.** 2010. 201p. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

APÊNDICES

Apêndice A - A Tecnologia de Incineração com Recuperação Energética

A.1 O processo tecnológico²³

O processo se inicia com a entrega dos RSD na usina por uma transportadora. Estes são pesados e controlados. Os dados são processados para os entregadores. Os resíduos são então despejados dos veículos sobre uma esteira que os encaminham para o depósito de resíduos. Resíduos volumosos são esmagados antes de passarem para o depósito de resíduos (Figura 12).

Alguns processos têm se aprimorado no pré-tratamento dos resíduos, anterior à incineração, para maior homogeneização, redução da umidade e aumento do poder calorífico, de forma a tornar estes resíduos em combustível de qualidade para a geração máxima de energia (HENRIQUES, 2004).



Figura 12 - Processo de incineração de resíduos com recuperação energética: entrega dos resíduos.

Fonte: ATAB (2010).

²³ O processo descrito nesta seção deriva quase que exclusivamente da tecnologia do ATAB, um consórcio de usina de tratamento térmico de resíduos, na Baviera, Alemanha. O ATAB está participando, a convite dos governos da Baviera e do Estado de São Paulo do desenvolvimento de um projeto de gestão de resíduos para as Regiões Metropolitanas de São Paulo. Informações disponíveis em: <http://www.atab.de/>. Acesso em: 02 ago 2010.

O depósito de resíduos serve para o armazenamento do suprimento de combustível (resíduos) de forma contínua e para a homogeneização dos resíduos para uma operação uniforme do incinerador. Nesta fase, o combustível é retirado do depósito de resíduos e jogado em um funil para a grelha de combustão (Figura 13).

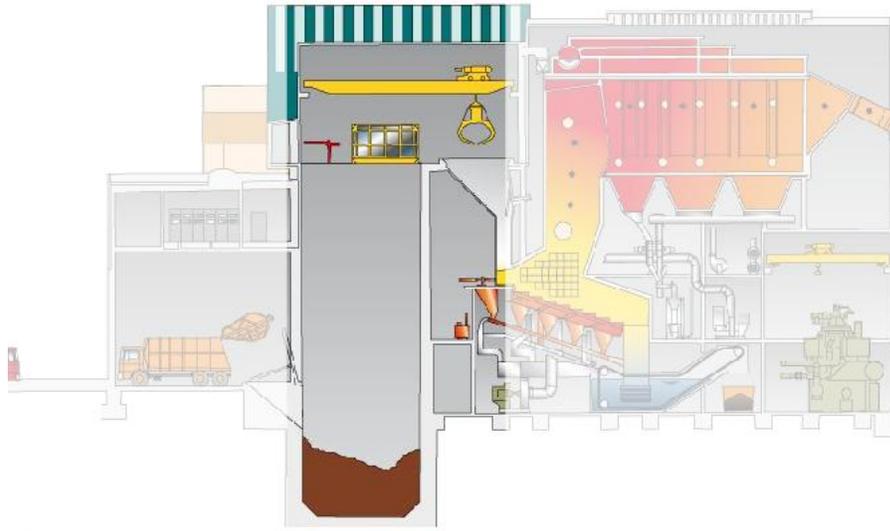


Figura 13 - Processo de incineração de resíduos com recuperação energética: depósito de resíduos.

Fonte: ATAB (2010).

Ao passar pela grelha os resíduos sólidos chegam à câmara primária, onde é injetado ar oxigênio e, se necessário um combustível auxiliar. Sendo, então, queimados

(...) em uma temperatura suficientemente alta para que algumas substâncias presentes se transformem em gases e outra assumam a forma de pequenas partículas. Neste dispositivo, a temperatura de operação varia entre 500°C e 900 °C. Em todas as configurações, a alimentação de oxigênio nessa câmara é subestequiométrica, evitando-se assim, gradientes elevados de temperatura. Nessas condições controladas, evita-se a volatilização de grandes quantidades de metais presentes no lixo, como chumbo, cádmio, cromo, mercúrio, entre outros. Além disso, minimiza-se a formação de óxidos nitrosos, que surgem apenas sob temperaturas mais elevadas (HENRIQUES, 2004).

O tempo de residência é, em média, cerca de 60 minutos para queimar completamente os resíduos. Ao final da grelha, as escórias caem em um banho de água sendo molhadas e depois

retiradas do processo (Figura 14). A quantidade deste material sólido após a incineração varia de 12 a 30% de massa (de 4 a 10% do volume) do material original, tendo o aspecto de cinza. Este material é totalmente esterilizado, podendo ser aterrado ou reaproveitado na construção civil (tijolos, capeamento de estradas, etc.) (HENRIQUES, 2004)

Na câmara secundária os gases provenientes da câmara primária são queimados a uma temperatura superior, em torno de 750-1250 °C, por um intervalo de tempo que seja suficiente para a completa combustão desta fumaça, cerca de 2 a 3 segundos. “Nesta temperatura, a probabilidade de existência de moléculas com grande número de átomos como dioxinas e furanos, compostos altamente nocivos aos seres humanos, é praticamente zero” (IEA, 1997 apud HENRIQUES, 2004; ARANDA, 2001 apud HENRIQUES, 2004; TOLMASQUIM apud HENRIQUES, 2004).

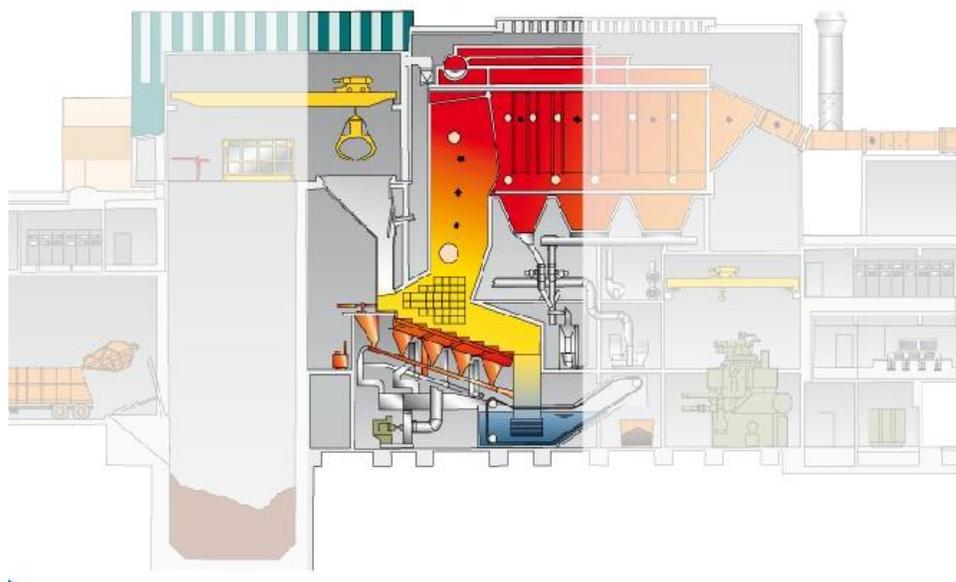


Figura 14 - Processo de incineração de resíduos com recuperação energética: combustão e resfriamento.
Fonte: ATAB (2010).

Os gases quentes a cerca de 1000°C são absorvidos por uma caldeira onde são gerados vapores, a uma temperatura de 400°C e pressão de 40 bar, que acionam uma turbina a vapor capaz de gerar energia elétrica. Os gases que passam pela caldeira sofrem um processo de

lavagem no “quencher”²⁴ de forma a serem neutralizados, e impedir a formação de dioxinas e furanos, que ocorre na faixa de 180 a 240°C. O resfriamento rápido ajuda a evitar a sua formação, mas, não é suficiente (Figura 15).

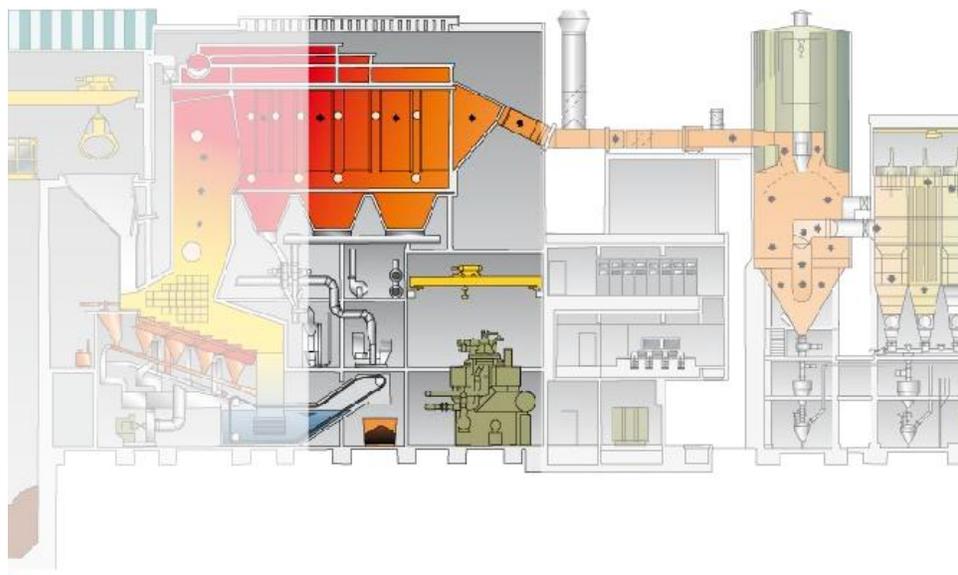


Figura 15 - Geração de energia elétrica através da geração de vapores de água.

Fonte: ATAB (2010).

Depois de queimados a altas temperaturas e passarem pelo processo de resfriamento, os gases passam por um sistema para o tratamento, realizado em três fases, através do uso de processos químicos e físicos (HENRIQUES, 2004).

Na primeira fase, os gases são absorvidos, injetando-se bicarbonato de sódio. Estes aditivos são utilizados para a deposição de poluentes presentes nos gases, são extremamente eficientes para a neutralização e captura de SO_x e HCl . Os resultados desta lavagem a seco em relação à anteriormente utilizada (mistura de água e cal) apresentam melhoria na eficiência da remoção de SO_2 (Figura 16).

²⁴ Local onde os gases são resfriados, de forma a evitar a formação de dioxinas e furanos, e manter os gases secos para evitar que se tornem corrosivos.

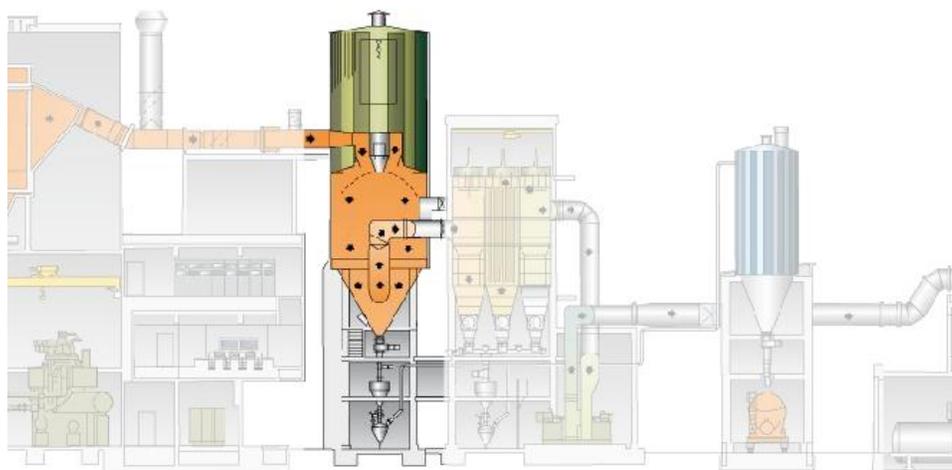


Figura 16 – Lavagem a seco dos gases.

Fonte: ATAB (2010).

Os gases já resfriados e neutralizados passam por um filtro de mangas. O filtro de mangas serve para recolher o material particulado para evitar a emissão de poeira para a atmosfera (Figura 17).

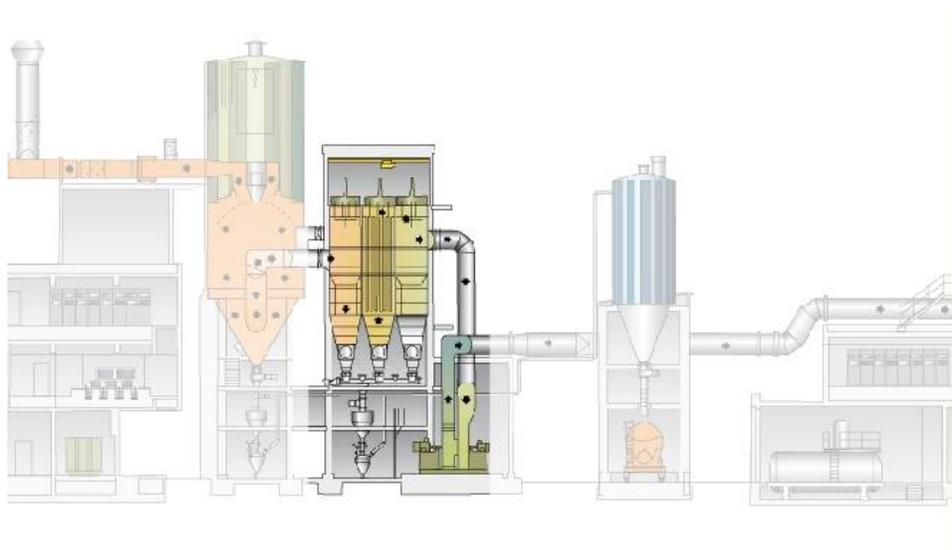


Figura 17 – Filtro de Mangas

Fonte: ATAB (2010).

Os gases seguem então para o reservatório de cal para serem limpos, onde há a captura dos combustíveis residuais (Figura 18).

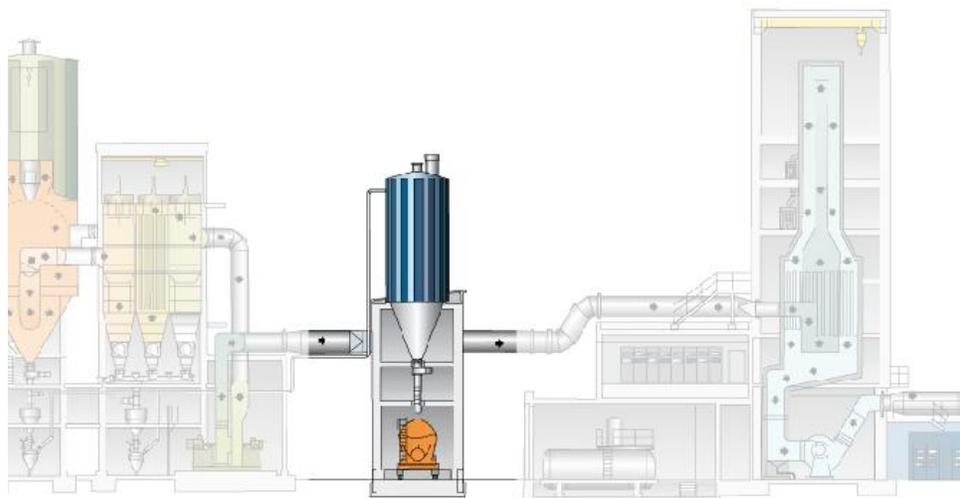


Figura 18 – Armazenamento de cal e de combustíveis residuais

Fonte: ATAB (2010).

Na terceira etapa do processo de limpeza os gases seguem para um fino catalisador. Com a adição de amoníaco são transformados por uma reação catalítica de óxidos de nitrogênio em nitrogênio e vapor de água (Figura 19).

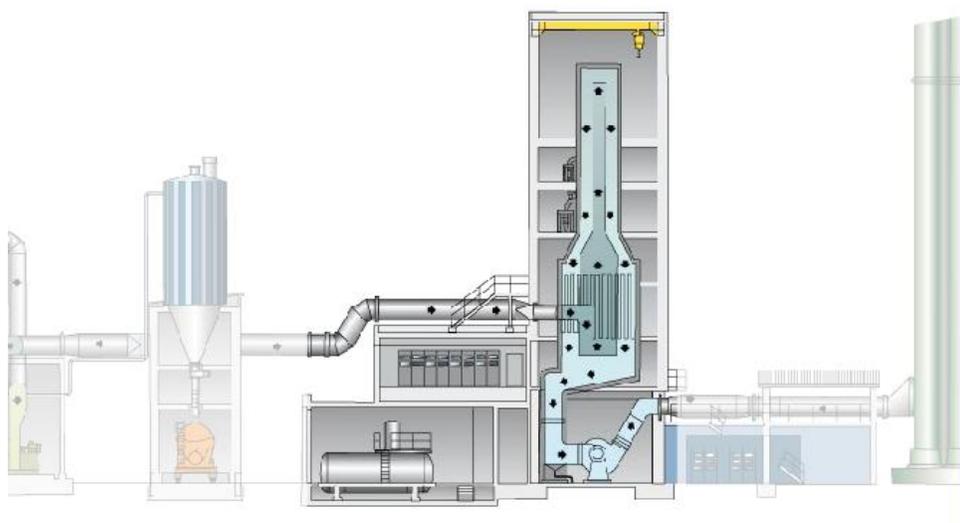


Figura 19 – Catalisador

Fonte: ATAB (2010)

O carvão e a cal servem para remover as dioxinas e furanos, alguns gases orgânicos, metais e gases ácidos.

Os gases limpos são, então, continuamente monitorados na estação de medição antes de chegarem à chaminé. As leituras, de uniformidade garantida, são gravadas e postas à disposição dos órgãos fiscalizadores (Figura 20)

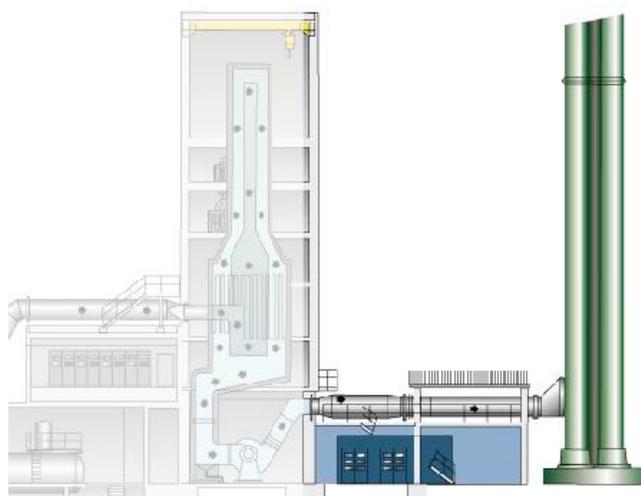


Figura 20 – Monitoração de gases

Fonte: ATAB (2010)

Com o uso das tecnologias certas é possível reduzir as emissões e atingir os limites permitidos. Além disso, a incineração gera resíduos, como a escória, as cinzas e efluentes líquidos provenientes da lavagem dos gases. As cinzas do fundo (escória) podem ser depositadas em aterro comum, pois é material essencialmente inerte. As cinzas aéreas apresentam certo grau de periculosidade pela alta concentração de metais e carbono ativado contaminado com metais ou matéria orgânica, sendo necessário seu depósito em aterros de resíduos perigosos (HENRIQUES, 2004).

Conforme sugerido por Pagliuso²⁵, o tratamento das cinzas poderia ser realizado através da combustão em Plasma Térmico²⁶, pois, segundo o mesmo, este processo seria recomendado para pequenos volumes ou acoplado a outros processos, já que é intensivo no uso de energia elétrica.

²⁵ PAGLIUSO, J. D. **Tratamento térmico de resíduos: gaseificação ou combustão?** 1º Simpósio de Resíduos Sólidos. São Carlos, 2009.

²⁶ Tecnologia de combustão que atinge altas temperaturas, entre 5.000 e 50.000°C.

Apêndice B – Comandos utilizados no software GAMS para o cenário 1

SETS

I municipios /bertioga, caraguatatuba, cubatao, guaruja, ilhabela, itanhaem, mongagua, peruibe, praiagrande, santos, saosebastiao, saovicente, ubatuba/

J usinas /bertiogau, caraguatatubau, cubataou, guarujau, ilhabelau, itanhaemu, mongaguau, peruibeu, praiagrandeu, santosu, saosebastiaou, saovicenteu, ubatubau/

N dia /baixa, alta/

K aterros /maua, santaisabel,santos,tremembe/;

SCALAR CAPUSIN capacidade diaria de incineracao da usina j /1200/;

SCALAR CO custo de operacao e manutencao da usina j /210/;

SCALAR COA custo de operacao do aterro k /65/;

SCALAR M quantidade de mwh por t de rsd /0.523/;

SCALAR R quantidade de co2 por t de rsd /1.5/;

SCALAR PE preco de venda da energia eletrica /351.81/;

SCALAR PCCC preco de comercializacao dos creditos de carbono /28.96/;

SCALAR F fator de reducao dos residuos /0.1/;

SCALAR NUM numero de usinas /1/;

TABLE S(I,N) producao diaria do municipio i

baixa alta

bertioga 76.9 134.6

caraguatatuba 96.15 200

cubatao 92.3 92.3

guaruja	184.8	369.6
ilhabela	41.27	190
itanhaem	65	195
mongagua	69.2	92.3
peruibe	69	138
praiagrande	346	1038
santos	577	692
saosebastiao	29.2	58.4
saovicente	430	494
ubatuba	61.5	230.8;

TABLE C(I,J) custo de transporte

	bertiogau	caraguatatubau	cubataou	...	saosebastiaou	saovicenteu	ubatubau
bertioga	2.25	50	75	...	125.46	78	68.4
caraguatatuba	50	2.25	67.6	...	35.4	68.4	69
cubatao	75	67.6	2.25	...	58	29.25	86.4
guaruja	51.33	62	44.25	...	53.2	28.32	80.4
ilhabela	100.58	59.04	60.4	...	33.75	60.8	105.3
itanhaem	114.39	87.6	84	...	78	73.5	106.4
mongagua	104.39	80	59.04	...	70.4	53.1	98.4
peruibe	48.4	98.8	109.2	...	89.2	98.8	117.2
praiagrande	78	70	28.32	...	60.4	11.25	88.8

santos	69	66	28.32	...	56.4	15.75	84.8
saosebastiao	125.46	35.4	58	...	2.25	58.8	94.38
saovicente	78	68.4	29.25	...	58.8	2.25	86.8
ubatuba	68.4	69	86.4	...	94.38	86.8	2.25;

TABLE CTR(J,K) custo de transporte da usina de incineracao em j para o aterro em k

	maua	santaisabel	santos	tremembe
bertiogau	123	119.31	69	68.4
caraguatatubau	66	50.8	66	48.8
cubataou	75	100.58	28.32	76.8
guarujau	104.39	51.2	22.5	80.8
ilhabelau	71.6	64	59.2	63.6
itanhaemu	100.58	62.8	82.5	96.8
mongaguau	106.6	55.2	59.04	89.2
peruibeu	51.2	73.6	107.9	107.6
praiagrandeu	98.67	48.8	24.75	82.8
santosu	90.09	112.8	2.25	82
saosebastiaou	69.6	57.6	56.4	59.6
saovicenteu	92.95	110.92	15.75	81.2
ubatubau	79.6	69.2	84.8	126.69;

TABLE CAPAT(K,N) capacidade diaria do aterro k

	baixa	alta
maua	841	1727
santaisabel	96.15	200
santos	1000.2	1380.8
tremembe	131.97	479.2;

VARIABLES

$X(I,J,N)$ quantidade mensal de residuos produzida no municipio i e enviada para a usina j

$B(J)$ numero de usinas

$E(J,K,N)$ escorias enviadas da usina j para o aterro k

Z lucro do processo de incineracao

REC(J)

CUS(J)

CAT(K);

POSITIVE VARIABLE X,E;

BINARY VARIABLE B;

EQUATIONS

LUCRO funcao objetivo

OFERTA(I,N) quantidade diária de residuos ofertada pelos municipios

EQUESTINC(J,N) equilibrio entre oferta e capacidade da usina de incineracao j

USINA numero de usinas a ser instalado

ESCORIAS (J,N)

CAPATERRO(K,N) capacidade de recepcao dos aterros para escorias e cinzas

RECEITA(J)

CUSTOUI(J)

CUSTOAT(K);

LUCRO.. $Z = e = (\text{SUM}((I,J,N), X(I,J,N)*M*PE) + \text{SUM}((I,J,N), X(I,J,N)*R*PCCC)) - \text{SUM}((I,J,N), X(I,J,N)*C(I,J)) - \text{SUM}((I,J,N), X(I,J,N)*CO) - \text{SUM}((J,K,N), E(J,K,N)*CTR(J,K)) - \text{SUM}((J,K,N), E(J,K,N)*COA);$

OFERTA(I,N).. $\text{SUM}((J), X(I,J,N)) = l = S(I,N);$

EQUESTINC(J,N).. $\text{SUM}((I), X(I,J,N)) = e = \text{CAPUSIN} * B(J);$

USINA.. $\text{SUM}((J), B(J)) = l = \text{NUM};$

ESCORIAS(J,N).. $\text{SUM}((K), E(J,K,N)) = e = \text{CAPUSIN} * B(J)*F;$

CAPATERRO(K,N).. $\text{SUM}((J), E(J,K,N)) = l = \text{CAPAT}(K,N);$

RECEITA(J).. $\text{REC}(J) = e = (\text{SUM}((I,N), X(I,J,N)*M*PE) + \text{SUM}((I,N), X(I,J,N)*R*PCCC));$

CUSTOUI(J).. $\text{CUS}(J) = e = \text{SUM}((I,N), X(I,J,N)*C(I,J)) + \text{SUM}((I,N), X(I,J,N)*CO);$

CUSTOAT(K).. $\text{CAT}(K) = e = \text{SUM}((J,N), E(J,K,N)*CTR(J,K)) + \text{SUM}((J,N), E(J,K,N)*COA);$

MODEL LOCALIZACAO /ALL/;

SOLVE LOCALIZACAO USING MIP MAXIMIZING Z;

DISPLAY X.L, Z.L, X.M, Z.M, E.L, E.M;

ANEXOS

Anexo A – Modelo do questionário aplicado às prefeituras

Questionário

- a. Em média, qual a quantidade de RSD coletada diariamente no Município?
- b. Realiza-se coleta seletiva no Município? Em caso afirmativo, qual o percentual de resíduos coletados seletivamente em relação à produção total de RSD do Município?
- c. Como são dispostos os RSD?
- d. A disposição final é realizada no próprio Município? Em caso negativo, em qual Município? A gestão do local de disposição de resíduos é pública ou particular?
- e. Quais são os gastos (R\$/t) com RSD nas etapas de:
 - a. Coleta:
 - b. Transporte:
 - c. Disposição final:

Anexo B – Distâncias entre Municípios

Tabela 27 – Distâncias entre os Municípios gerador i de RSD e o potencial Município receptor j , em km

	Bertioga	Caraguatatuba	Cubatão	Guarujá	Ilhabela	Itanhaém	Mongaguá
Bertioga	1	125	50	29	107	93	73
Caraguatatuba	125	1	169	155	36	219	200
Cubatão	50	169	1	25	151	56	36
Guarujá	29	155	25	1	138	64	45
Ilhabela	107	36	151	138	1	203	183
Itanhaém	93	219	56	64	203	1	23
Mongaguá	73	200	36	45	183	23	1
Peruíbe	121	247	84	94	231	28	48
Praia Grande	52	175	16	23	161	44	25
Santos	46	165	16	10	148	55	36
São Sebastião	102	20	145	133	15	195	176
São Vicente	52	171	13	16	152	49	30
Ubatuba	171	46	216	201	81	266	246

	Peruíbe	Praia Grande	Santos	São Sebastião	São Vicente	Ubatuba
Bertioga	121	52	46	102	52	171
Caraguatatuba	247	175	165	20	171	46
Cubatão	84	16	16	145	13	216
Guarujá	94	23	10	133	16	201
Ilhabela	231	161	148	15	152	81
Itanhaém	28	44	55	195	49	266
Mongaguá	48	25	36	176	30	246
Peruíbe	1	71	83	223	76	293
Praia Grande	71	1	11	151	5	222
Santos	83	11	1	141	7	212
São Sebastião	223	151	141	1	147	66
São Vicente	76	5	7	147	1	217
Ubatuba	293	222	212	66	217	1

Fonte: Guia Rodoviário Quatro Rodas (2011)

Tabela 28 – Distância entre o potencial Município receptor j e o aterro sanitário localizado no Município k , em km

	Mauá	Santa Isabel	Santos	Tremembé
Bertioga	100	97	46	171
Caraguatatuba	165	127	165	122
Cubatão	50	107	16	192
Guarujá	73	128	10	202
Ilhabela	179	160	148	159
Itanhaém	107	157	55	242
Mongaguá	82	138	36	223
Peruíbe	128	184	83	269
Praia Grande	69	122	11	207
Santos	63	120	1	205
São Sebastião	174	144	141	149
São Vicente	65	118	7	203
Ubatuba	199	173	212	103

Fonte: Guia Rodoviário Quatro Rodas (2011)

Anexo C – Custo de Transporte dos RSD

Tabela 29 – Custo de Transporte entre o Município gerador *i* e o Município receptor *j*, em R\$/t de RSD

	Bertioga	Caraguatatuba	Cubatão	Guarujá	Ilhabela	Itanhaém	Mongaguá
Bertioga	2,25	50,00	75,00	51,33	100,58	114,39	104,39
Caraguatatuba	50,00	2,25	67,60	62,00	59,04	87,60	80,00
Cubatão	75,00	67,60	2,25	44,25	60,40	84,00	59,04
Guarujá	51,33	62,00	44,25	2,25	55,20	91,52	67,50
Ilhabela	100,58	59,04	60,40	55,20	2,25	81,20	73,20
Itanhaém	114,39	87,60	84,00	91,52	81,20	2,25	40,71
Mongaguá	104,39	80,00	59,04	67,50	73,20	40,71	2,25
Peruíbe	48,40	98,80	109,20	115,62	92,40	49,56	72,00
Praia Grande	78,00	70,00	28,32	40,71	64,40	72,16	44,25
Santos	69,00	66,00	28,32	22,50	59,20	82,50	59,04
São Sebastião	125,46	35,40	58,00	53,20	33,75	78,00	70,40
São Vicente	78,00	68,40	29,25	28,32	60,80	73,50	53,10
Ubatuba	68,40	69,00	86,40	80,40	105,30	106,40	98,40

	Peruíbe	Praia Grande	Santos	São Sebastião	São Vicente	Ubatuba
Bertioga	48,40	78,00	69,00	125,46	78,00	68,40
Caraguatatuba	98,80	70,00	66,00	35,40	68,40	69,00
Cubatão	109,20	28,32	28,32	58,00	29,25	86,40
Guarujá	115,62	40,71	22,50	53,20	28,32	80,40
Ilhabela	92,40	64,40	59,20	33,75	60,80	105,30
Itanhaém	49,56	72,16	82,50	78,00	73,50	106,40
Mongaguá	72,00	44,25	59,04	70,40	53,10	98,40
Peruíbe	2,25	101,53	107,90	89,20	98,80	117,20
Praia Grande	101,53	2,25	24,75	60,40	11,25	88,80
Santos	107,90	24,75	2,25	56,40	15,75	84,80
São Sebastião	89,20	60,40	56,40	2,25	58,80	94,38
São Vicente	98,80	11,25	15,75	58,80	2,25	86,80
Ubatuba	117,20	88,80	84,80	94,38	86,80	2,25

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados desta pesquisa.

Tabela 30 – Custo de Transporte entre o potencial Município receptor j e o aterro sanitário localizado no Município k , em R\$/t de RSD

	Mauá	Santa Isabel	Santos	Tremembé
Bertioga	123,00	119,31	69,00	68,40
Caraguatatuba	66,00	50,80	66,00	48,80
Cubatão	75,00	100,58	28,32	76,80
Guarujá	104,39	51,20	22,50	80,80
Ilhabela	71,60	64,00	59,20	63,60
Itanhaém	100,58	62,80	82,50	96,80
Mongaguá	106,60	55,20	59,04	89,20
Peruíbe	51,20	73,60	107,90	107,60
Praia Grande	98,67	48,80	24,75	82,80
Santos	90,09	112,80	2,25	82,00
São Sebastião	69,60	57,60	56,40	59,60
São Vicente	92,95	110,92	15,75	81,20
Ubatuba	79,60	69,20	84,80	126,69

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados desta pesquisa.