



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Faculdade de Engenharia
Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente

Fabício Viana Andretti

**Avaliação técnico-econômica de uma planta de incineração de
resíduos sólidos urbanos e os principais desafios para sua
utilização - uma simulação aplicada a cidade do Rio de Janeiro,
Brasil**

Rio de Janeiro

2021

Fabício Viana Andretti

**Avaliação técnico-econômica de uma planta de incineração de
resíduos sólidos urbanos e os principais desafios para sua
utilização - uma simulação aplicada a cidade do Rio de Janeiro,
Brasil**

Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Tecnologias de Tratamento da Poluição Ambiental

Orientadora: Professor Doutor João Alberto Ferreira

Coorientadora: Doutora Camille Ferreira Mannarino

Rio de Janeiro

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE UERJ/REDE SIRIUS/CTCB

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte:

Fabrcio Viana Andretti

Fabrcio Viana Andretti

06/03/2021

Data

Fabrcio Viana Andretti

**Avaliao tcnico-econmica de uma planta de incinerao de
resduos slidos urbanos e os principais desafios para sua
utilizao - uma simulao aplicada a cidade do Rio de Janeiro,
Brasil**

Tese apresentada como requisito parcial para a obteno do ttulo de Doutor, ao Programa de Pds-Graduao em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. rea de Concentrao: Tecnologias de Tratamento da Poluio Ambiental

Aprovada em 19 de fevereiro de 2021

Banca Examinadora:



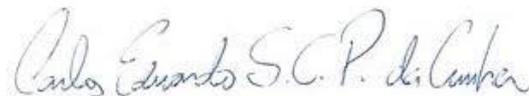
DSc. Joao Alberto Ferreira (Orientador)
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)



DSc. Deborah Zouain
Universidade UNIGRANRIO



DSc. Alexandre Lioi Nascentes
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)



DSc. Carlos Eduardo Soares Canejo Pinheiro da Costa
Universidade Veiga de Almeida (UVA)



DSc. Elisabeth Ritter
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

DEDICATÓRIA

Ao meu pai (*in memoriam*).
Todo processo seletivo para entrada no Doutorado foi realizado ao lado do meu pai internado e mesmo assim ele sempre buscou, nos seus 33 dias de internação antes de falecer, deixar bem claro que tinha orgulho de mim como filho e a ele dedico a conclusão desta minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. João Alberto Ferreira e a minha coorientadora, Camille Ferreira Mannarino, por me apoiarem continuamente no meu projeto de pesquisa, por terem me orientado com conhecimento e experiência, contribuindo para meu processo evolutivo acadêmico para alcance dos objetivos de conclusão das disciplinas, dos artigos e da presente tese com suas horas de dedicação e total motivação. Especialmente por manterem um relacionamento “leve” de amizade e compreensão no meu momento profissional de compartilhar tempo com atividades acadêmicas, pessoais e profissionais. Obrigado!

Em especial, agradeço ao Prof. João Alberto que desde o dia da minha inscrição no doutorado me recebeu e me escutou com total atenção, compreendendo minha não formação nem experiência na área naquele momento e reconhecendo desde então meu potencial com palavras de incentivo e estímulo! Desde a nossa primeira conversa você demonstrou toda sua importância para meu crescimento.

Agradeço à Liliane Bello, pela paciência ao longo deste árduo período de dedicação acadêmica, onde muitas vezes estive ausente. Obrigado por toda sua serenidade e companheirismo buscando compreender a importância do seu incentivo para a conclusão desta minha jornada. Obrigado por me escutar, retribuir com seu amor que me inspirou em muitos momentos, e obrigado pelo carinho ao longo desta jornada e, principalmente, por fazer parte deste momento importante na minha vida. Obrigado meu amor!

Agradeço ao meu amigo, Luciano Martins, por acreditar em mim e me incentivar a evoluir na minha carreira acadêmica e profissional depositando confiança e auto estima em tudo que faço. Obrigado meu amigo!

Agradeço à minha mãe, Nadege Andretti, por acreditar em mim como filho e profissional tendo paciência quando eu estava investindo na minha carreira sem poder viajar para Campos para visita-la. Obrigado!

Agradeço às Professoras Elisabeth Ritter, Ana Ghislane Van Elk e Daniele Bila, por todo conhecimento compartilhado nas aulas ministradas e nos congressos que estivemos juntos, em especial em Sardenha em 2017 e 2019. Obrigado!

Agradeço aos gestores das plantas de incineração na Suíça (SIG Geneva, TRIDEL Lausanne, HAGENHOLZ Zurich e ERZO Oftringen) e em Portugal (Valor Sul

Lisboa e Lipor Porto) que visitei para realização desta pesquisa, e em especial aos responsáveis pela estruturação destas visitas, Mauro Gandolla e Mario Russo por aceitarem coparticipar da mesma e em especial ao Mauro Gandolla por acompanhar e orientar durante a realização de todas visitas técnicas aos incineradores da Suíça. Obrigado!

Agradeço a Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pela concessão da bolsa do programa “Bolsas Emergentes (MSc e DSc)” que muito auxiliou na realização da nossa pesquisa.

Agradeço aos diversos colegas da turma de doutorado pelas trocas de experiência e companheirismo durante este processo. Obrigado!

EPÍGRAFE

“A satisfação está no esforço e não apenas na realização final”

Mahatma Gandhi

RESUMO

ANDRETTI, F. V. *Avaliação técnico-econômica de planta de incineração de resíduos sólidos urbano em países em desenvolvimento - uma simulação aplicada a cidade do Rio de Janeiro, Brasil*. 2021. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

O tratamento adequado e o descarte final de resíduos sólidos urbanos (RSU) ainda representam um grande desafio em muitos países, particularmente nos que estão em desenvolvimento. Na Europa, a utilização da energia gerada nos incineradores com recuperação energética, ou Waste-to-Energy (WtE), têm aumentado nos últimos anos e sua ampla utilização vem indicando oportunidade para os países em desenvolvimento. O objetivo desta tese é propor e aplicar a simulação de um modelo de viabilidade técnico econômica de um incinerador de RSU com recuperação energética para a cidade do Rio de Janeiro (Brasil) de 270.000 toneladas ao ano. Inicialmente são apresentadas bases da formulação de um modelo para o estudo de viabilidade para a implementação de um incinerador e, em seguida, é realizado um estudo de simulação e apresentado os resultados para aplicação no Rio de Janeiro. Um modelo financeiro com dois cenários diferentes foi formulado considerando a variação da taxa de juros do banco e o nível do custo de capital (CAPEX). O Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Retorno do Investimento (ROI) foram utilizados como indicadores de viabilidade financeira. A análise de sensibilidade foi realizada para determinar a faixa na qual o preço da eletricidade e a tarifa por tonelada (*gate fee*) afetaram a viabilidade financeira do modelo. A tese apresenta os resultados de um estudo também extensivo ao uso da incineração de RSU com recuperação de energia em países em desenvolvimento. Os fatores críticos que dificultam o uso dessa tecnologia também foram identificados. Foram discutidos os desafios como a ausência de regulamentação e padrões técnicos no Brasil, a seleção adequada do modelo de negócios, a adoção de tecnologia não ultrapassada, a importância da caracterização dos resíduos da região, o impacto da taxa de juros bancários, a receita mínima economicamente viável e os aspectos sociais. A legislação nacional de controle da poluição do ar não atende aos rígidos padrões internacionais (Europa) e precisaria ser atualizada, além de outros desafios listados e endereçados ações para trata-los neste estudo. As conclusões mostram que a viabilidade econômica depende de receitas provenientes da venda de eletricidade e *gate fee* superiores ao mínimo de US\$ 0,134 por kWh e US\$ 60 por tonelada, respectivamente. Além disso, taxas de financiamento mais baixas do que as praticadas no país seriam necessárias.

Palavras-chave: Incinerador; Waste-to-Energy; Recuperação de energia; Resíduos sólidos urbanos; Estudo de viabilidade técnico-econômica, países em desenvolvimento.

ABSTRACT

ANDRETTI, F. V. *Technical-economic evaluation of an urban solid waste incineration plant in developing countries - a simulation applied to the city of Rio de Janeiro, Brazil*. 2021. 120 f. Thesis (Doctorate in Environmental Engineering) - Department of Sanitary and Environmental Engineering, College of Engineering, Rio de Janeiro State University, Rio de Janeiro, 2021.

Proper treatment and final disposal of municipal solid waste (MSW) still represents a major challenge in many countries, particularly in developing countries. In Europe, the use of energy generated in energy recovery incinerators, or Waste-to-Energy (WtE), has increased in recent years. The objective of this thesis is to propose and apply the simulation of a technical economic feasibility model for an MSW incinerator with energy recovery for the city of Rio de Janeiro (Brazil) of 270,000 tons per year. Initially, the bases for the formulation of a model for the feasibility study for the implementation of an incinerator are presented, and then a simulation study is carried out and the results are presented for application in Rio de Janeiro. A financial model with two different scenarios was formulated considering the variation in the bank's interest rate and the level of cost of capital (CAPEX). Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) and Return on Investment (ROI) were used as indicators of financial viability. The sensitivity analysis was performed to determine the range in which the electricity price and the tariff per ton (gate fee) affected the financial viability of the model. The thesis presents the results of a study also extensive to the use of MSW incineration with energy recovery in developing countries. Critical factors that hinder the use of this technology have also been identified. Challenges were discussed, such as the lack of regulation and technical standards in Brazil, the proper selection of the business model, the adoption of unsurpassed technology, the importance of characterizing waste in the region, the impact of bank interest rates, minimum revenue economically viable and social aspects. National air pollution control legislation does not meet strict international standards (Europe) and would need to be updated, in addition to other challenges listed and actions addressed to address them in this study. The findings show that economic viability depends on revenues from the sale of electricity and gate fee above the minimum of US \$ 0.134 per kWh and US \$ 60 per ton, respectively. Lower financing rates would also be necessary than those practiced in the country.

Keywords: Waste-to-energy; Incinerator; Energy recovery; Municipal solid waste; Techno-economic feasibility study, developing countries.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxo do processo em uma planta de incineração com recuperação energética.....	16
Figura 2 – Descrição genérica de um processo de incineração	18
Figura 3 – Área de descarregamento dos resíduos no fosso via modal rodoviário em Zurique	18
Figura 4 – Recebimento de resíduos via modal ferroviário em Lausanne.....	19
Figura 5 – Sala de controle do incinerador de Genebra	19
Figura 6 – Área de armazenagem de resíduos (fosso)	20
Figura 7 – Guindaste rolante em operação no fosso de armazenagem dos resíduos	20
Figura 8 – Etapas para realização de estudo de viabilidade técnico-econômica.....	30
Figura 9 – Foto da portaria do incinerador Hagenholz em Zurique (Suíça).....	36
Figura 10 – Fachada do incinerador ERZO em Oftringen (Suíça).....	37
Figura 11 – Fotos do gerador do incinerador TRIDEL.....	38
Figura 12 – Foto da portaria de entrada dos caminhões no incinerador SIG (Suíça)	38
Figura 13 – Foto do acesso ao incinerador Lipor (Portugal).....	39
Figura 14 – Foto da vista aérea do incinerador Valorsul (Portugal)	39
Figura 15 – Custo de Capital versus Capacidade da planta de incineração com recuperação energética.....	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais critérios metodológicos para tomada de decisão em relação à localização do incinerador	47
Quadro 2 - Principais efeitos diretos e externalidades a serem considerados para projetos em gerenciamento de resíduos.....	70
Quadro 3 - Fases para a realização da análise financeira	80
Quadro 4 - Principais parâmetros operacionais e financeiros do projeto	80
Quadro 5 - Principais parâmetros financeiros do projeto.....	81
Quadro 6 - Estrutura da DRE elaborada	83
Quadro 7 - Escala de atratividade proposta para análise de sensibilidade	86
Quadro 8 - Principais riscos em projetos de incineradores de RSU com recuperação energética.....	87
Quadro 9 - Escala de atratividade proposta para análise de sensibilidade com farol	90
Quadro 10 - Fatores críticos e ações propostas.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Composição dos resíduos em diversos países desenvolvidos e em desenvolvimento	09
Tabela 02 – Tipos de tratamento de resíduos e destinação final nas seis regiões (em porcentagem)	11
Tabela 03 – Padrões de emissão para incineradores de RSU em diferentes países.	28
Tabela 04 – Geração, tratamento e disposição final de RSU em 2015 (milhares de toneladas).....	33
Tabela 05 – Características dos incineradores nas visitas técnicas realizadas na Europa.....	36
Tabela 06 – Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do Rio de Janeiro em 2017	50
Tabela 07 - Poder Calorífico Inferior e Capacidade dos incineradores na Europa e nos EUA.	51
Tabela 08 – Principais componentes de CAPEX de uma planta convencional de incineração de RSU com recuperação energética	54
Tabela 09 - Requisitos de área de terra.....	58
Tabela 10 – Principais impostos sobre projetos de energia no Brasil.....	62
Tabela 11 – Principais condições no Brasil e UE para controle de emissão de poluentes em plantas de processamento térmico de RSU.....	71
Tabela 12 – Principais indicadores tradicionais específicos para avaliação financeira	84
Tabela 13 – Principais parâmetros operacionais e financeiros do projeto do incinerador para o Rio de Janeiro.	88
Tabela 14 – Principais parâmetros financeiros do projeto	89
Tabela 15 – Resultados financeiros (cenário base).....	90
Tabela 16 – Resultados da análise de sensibilidade de VPL (a), TIR (b) e ROI (c) .	91
Tabela 17 – Parâmetros dos cenários	93
Tabela 18 – Resultados e <i>ranking</i> dos cenários	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE – Associação de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ACR - Ambiente de Contratação Regulada

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

BAT - *Best Available Techniques*

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento

BOT - *Build, Operate and Transfer*

CAGR – *Compound annual growth rate*

CAPEX - *Capital Expenditure*

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CDR - Combustível Derivado de Resíduos

CER - Certificado de Emissão Reduzida

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CSLL - Contribuição Social sobre Lucro Líquido

COFINS - Contribuição para Financiamento da Seguridade Social

DRE - Demonstração do Resultado do Exercício

EIA – Estudo de Impacto Ambiental

EPA - Agência de Proteção Ambiental

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

GEE - Gases do Efeito Estufa

GIRS - Gestão Integrada de Resíduos Sólidos

ICMS - Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

IDH - Índice de Desenvolvimento Humano

IPI - Imposto sobre Produtos Industrializados

IPTU - Imposto Predial e Territorial Urbano

IR - Imposto de Renda

IRPJ - Imposto de Renda Pessoa Jurídica

ISS - Impostos Sobre Serviços

LCV - *Lower Calorific Value*

LNSB - Lei Nacional de Saneamento Básico

OPEX - *Operational Expenditure*

PCI - Poder Calorífico Inferior

PDI - Plano Diretor de Implementação
PGIRS - Plano de Gestão Integrada de Resíduos
PIB – Produto Interno Bruto
PIS - Programa de Integração Social
PLC - Projeto de Lei Complementar
PLANSAB - Plano Nacional de Saneamento Básico
PNE - Plano Nacional de Energia
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
ROI - Retorno sobre o Investimento
RSU – Resíduos Sólido Urbano
SPB - *Simple Payback*
SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TIR - Taxa Interna de Retorno
TJLP - Taxa de Juros de Longo Prazo
VPL - Valor Presente Líquido
WTE – *Waste-to-Energy*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO:	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Geral	3
1.1.2. Específicos:	3
1.2. Contribuições científicas	4
1.3. Estrutura do trabalho:	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:	6
2.1 Geração e Composição de RSU nos países desenvolvidos e em desenvolvimento	6
2.2. Tratamento e Destinação de RSU	10
2.3. Alternativa de tratamento térmico com aproveitamento energético por meio de incineradores	14
2.4. Processo de incineração com recuperação energética.	16
2.5 Incineração nos países desenvolvidos.	24
2.6 Incineração nos países em desenvolvimento	26
2.7. Histórico da incineração de RSU no Brasil	29
2.8. Estudos de viabilidade para plantas de incineração	30
3. METODOLOGIA:	31
3.1. Revisão Bibliográfica.	31
3.2. Modelo de Viabilidade Técnica, Econômica e Financeira	32
3.3. Projeto Base.	34
3.4. Visitas Técnicas	35
3.4.1. Incinerador Zürich-Hagenholz - Suíça.	38
3.4.2. Incinerador KVA Oftringen ERZO - Suíça	39
3.4.3. Incinerador centre TRIDEL Lausanne - Suíça	40
3.4.4. Incinerador SIG Les Cheneviers Genebra - Suíça	40
3.4.5. Incinerador Lipor Porto - Portugal	41
3.4.6. Incinerador ValorSul Lisboa - Portugal.	42
4. RESULTADOS:	43
4.1. Estudo de regionalização	43
4.2. Estudo de demanda	51
4.3. Estudo do valor do investimento	53
4.4. Estudo de custos e despesas	59
4.5. Estudo das receitas.	63

4.5.1. Venda de eletricidade	65
4.5.2. Tarifa para o tratamento.....	66
4.5.3. Venda de metais	67
4.6. Avaliação econômico-social.....	67
4.7. Estudo do modelo de negócio.....	72
4.8. Avaliação financeira	79
4.8.1. Estabelecer parâmetros operacionais.....	80
4.8.2. Estabelecer premissas financeiras.....	80
4.8.3. Elaborar Demonstração de Resultados de Exercício (DRE)	81
4.8.4. Definir indicadores de rentabilidade financeira	84
4.8.5. Análise de sensibilidade.....	85
4.8.6. Análise de cenários.....	86
4.8.7. Análise de risco.....	86
4.9. Simulação de implantação de Incinerador de RSU com recuperação energética no município do Rio de Janeiro.....	88
4.10. Fatores críticos na implementação de incineradores de RSU em países em desenvolvimento e no Brasil	93
4.11. Situação atual da incineração de RSU com recuperação energética no Brasil	95
5. DISCUSSÕES:.....	97
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS:	102
7. SUGESTÕES:	104
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA:	105

1. INTRODUÇÃO:

A incineração com recuperação energética ocupa um lugar importante na gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) nos países desenvolvidos e está emergindo nos países em desenvolvimento (UN ENVIRONMENT, 2019). Globalmente, mais de 200 plantas de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com recuperação energética (muitas em países em desenvolvimento) estão atualmente em construção e estarão operacionais entre 2021 e 2023 (UN ENVIRONMENT, 2019).

A implementação de plantas de incineração de RSU com recuperação energética nos países em desenvolvimento apresenta desafios, como as dificuldades de adaptação às condições locais e a aceitação da sociedade (VERGARA e TCHOBANOGLOUS, 2012), além das questões que envolvem a regulação, a existência de padrões técnicos, os modelos de negócio apropriados, a tecnologia a ser adotada para garantir padrões aceitáveis de emissões atmosféricas e, não menos importante, os aspectos relacionados a viabilidade econômica do empreendimento, dado que o mesmo deve ser sustentável economicamente.

Já existem movimentos de implantação de incineradores de resíduos sólidos urbanos no Brasil e é fundamental que se tenha uma melhor compreensão da sua adequabilidade às condições do país e aos obstáculos a serem superados para evitar projetos que consumam elevados recursos e que possam não atender aos objetivos a que se destinam.

O tratamento adequado e o descarte final de resíduos sólidos urbanos (RSU) ainda representam um grande desafio em muitos países, particularmente nos que estão em desenvolvimento. O crescimento populacional e o desenvolvimento econômico no mundo e no Brasil aumentaram a produção de RSU, causando problemas ambientais, particularmente, nas grandes cidades. O descarte incorreto de resíduos, além de impactos ambientais e na saúde, pode resultar em perda de material reciclável e desperdício do potencial energético.

No Brasil, a disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos ainda é muito elevada. De acordo com o Sistema Nacional de Informações de Saneamento – SNIS, dos 55,34 milhões de toneladas coletadas de RSU, 40,09 milhões (72,4%) são dispostos em aterros sanitários e 21,6% em sistemas inadequados no solo (aterros controlados e lixões) e 6% em usinas de triagem e compostagem (SNIS, 2018). Embora os dados da Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e

Resíduos Especiais (Abrelpe) diverjam um pouco, as ordens de grandeza são também muito significativas. Segunda a mesma, atualmente, no Brasil, 59,5% dos resíduos recolhidos são direcionados para aterros e 40,5% (cerca de 81.000 t / dia) vão para destinos inadequados (ABRELPE, 2018).

Considerando-se estes dados, a prioridade do país para destinação dos resíduos sólidos urbanos é a implementação de novos aterros sanitários. Contudo, quando se consideram os dados de forma regionalizada, constata-se que em algumas regiões a situação é bastante diferenciada. Nas principais regiões metropolitanas do Brasil (São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, por exemplo), onde a disposição dos resíduos sólidos urbanos ocorre de forma adequada, em aterros sanitários, existem dificuldades para implementar novas unidades em função da pouca disponibilidade de áreas próximas aos centros urbanos geradores dos resíduos, além da existência de grande resistência das comunidades locais aos aterros. Além disso, a disposição em aterro consome terras valiosas e pode apresentar riscos significativos para à saúde humana, se não bem administrados (EEA, 2007).

Alguns municípios do Brasil estão buscando alternativas para tratamento dos resíduos sólidos urbanos, sendo uma delas o tratamento térmico com recuperação energética. Já existem quatro iniciativas de avaliação de utilização de incineradores de RSU no país nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro. Para se selecionar uma tecnologia para o tratamento de RSU, é muito importante que sejam realizados estudos de viabilidade técnica, econômica e social (UN ENVIRONMENT, 2018).

O total de RSU depositados em aterros na União Europeia (UE) diminuiu 88 milhões de toneladas, ou seja, 60% de 145 milhões de toneladas (302 kg/hab/ano) em 1995 para 58 milhões de toneladas (113 kg/hab/ano) em 2017. Isso corresponde a um declínio médio anual de 4,1% (EUROSTAT, 2019).

No período mais curto, de 2005 a 2017, a utilização dos aterros sanitários caiu 5,6% ao ano em média. Consequentemente, a quantidade de resíduos sólidos urbanos depositados em aterros na UE diminuiu de 64% em 1995 para 23% em 2017 (EUROSTAT, 2019).

A quantidade de resíduos reciclados (reciclagem e compostagem de materiais orgânicos) aumentou de 39 milhões de toneladas (81 kg/hab/ano) em 1995 para 116 milhões de toneladas (215 kg/hab/ano) em 2017 a uma taxa média anual de 5,0% (EUROSTAT, 2019).

Desde 1995, a quantidade de resíduos sólidos urbanos incinerados na UE-28 aumentou 38 milhões de toneladas ou 118% e representou 70 milhões de toneladas em 2017. Os resíduos urbanos incinerados passaram de 67 kg/hab/ano para 137 kg/hab/ano (EUROSTAT, 2019).

A ênfase na aplicação da escala hierárquica do modelo de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (GIRS) prevista na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que inclui reduzir a geração, aumentar a reciclagem de materiais e restringir o uso de aterros, deverá implicar no desenvolvimento de alternativas para o tratamento e disposição final dos resíduos, entre elas, o processamento térmico no tratamento de RSU através da tecnologia de incineração com recuperação energética. Apesar disso, a PNRS instituída em 2010, não especifica ações obrigatórias, com metas e cronogramas, para a recuperação energética dos resíduos sólidos (CÂNDIDO *et al.*, 2011). Além das questões relacionadas à gestão de resíduos, a diversificação da matriz energética pode tornar a aplicação da incineração economicamente atrativa (SORRELL, 2015). As plantas de incineração com recuperação energética contribuíram significativamente para as energias renováveis em países europeus, como a Suíça, a Dinamarca e a Suécia (MAISIRI *et al.*, 2015). Tal temática faz florescer inúmeras questões relacionadas a viabilidade da aplicação dessa tecnologia, em países em desenvolvimento como no Brasil com suas particularidades como, por exemplo, as dimensões continentais dos estados.

1.1. Objetivos

1.1.1. Geral

Propor e aplicar um modelo de análise de viabilidade técnico-econômica para implantação de um incinerador de RSU com recuperação energética para o município do Rio de Janeiro, identificando os principais desafios e respectivas ações para utilização desta tecnologia no Brasil.

1.1.2. Específicos:

- Propor um modelo para orientar a realização de estudos de viabilidade técnico-econômico de implementação de plantas de incineração de RSU com recuperação energética em países em desenvolvimento;
- Formular os parâmetros e identificar indicadores financeiros do projeto do incinerador a serem considerados no estudo de viabilidade financeira;

- Aplicar o modelo de avaliação técnico-econômica na simulação de implementação de uma planta de incineração de RSU com recuperação energética para a cidade do Rio de Janeiro;
- Realizar uma análise de sensibilidade para avaliar o peso dos principais parâmetros que influenciam a viabilidade financeira do empreendimento;
- Identificar os fatores críticos e desafios para a implementação da tecnologia no Brasil, sejam de ordem técnica, de controle, econômicos, financeiros e sociais.
- Identificar ações para mitigar os fatores críticos constatados.

1.2. Contribuições científicas

O resultado da pesquisa poderá ser utilizado como fonte de consulta de informações para pesquisadores e gestores envolvidos com o tema incineração de RSU através do uso das bases utilizadas para formulação do modelo e das orientações acerca do estudo de viabilidade técnico-econômico. Ademais, a presente pesquisa pretende contribuir para o melhor entendimento sobre os principais desafios para utilização dessa tecnologia de tratamento térmico de RSU.

1.3. Estrutura do trabalho:

A tese foi estruturada nos seguintes itens: Introdução; Revisão Bibliográfica; Metodologia; Resultados; Discussão; Considerações Finais e; Sugestões de Trabalhos Futuros.

A revisão bibliográfica, percorrida no capítulo 2, é iniciada com uma contextualização ampla sobre o processo e a tecnologia de tratamento térmico com recuperação energética na gestão de resíduos sólidos urbanos. Ainda no capítulo 2 é apresentada uma visão da utilização desta tecnologia nos países desenvolvidos e em desenvolvimento. Por último, é apresentado um histórico da utilização da incineração, ainda sem uso da tecnologia adequada, no Brasil.

A metodologia no capítulo 3, foi desenvolvida a partir da revisão bibliográfica conformando um denso referencial teórico, constituído de conceitos, legislações/normas, diretrizes e procedimentos, nacionais e internacionais relacionados ao tema da pesquisa. Tendo como base a portaria nacional nº 557, de 11 de novembro de 2016, do Ministério de Estado das Cidades (BRASIL, 2016), que estabelece referências para a elaboração de estudos de viabilidade técnica e

econômico-financeira (EVTE) previstos no art. 11, inciso II, da Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007 - Lei Nacional de Saneamento Básico (LNSB) (BRASIL, 2007), foram elencados os principais aspectos necessários para orientar uma avaliação técnico-econômica para implementação de um projeto de uma planta de incineração de RSU com recuperação energética. Neste capítulo, também é discorrido sobre os parâmetros financeiros do incinerador a serem considerado no estudo de viabilidade financeira do projeto.

Os resultados (capítulo 4) foram subdivididos em dois grupos: do item 4.1 ao 4.8 e do item 4.9 ao 4.11. Do item 4.1 ao 4.8 são detalhados os resultados gerais quanto ao modelo de estudo de viabilidade técnico-econômica de uma planta de incineração com recuperação energética de RSU em países em desenvolvimento para as 8 etapas preconizadas na portaria nº 557 (estudo de regionalização; estudo de demanda; estudo do valor do investimento; estudo de custos e despesas; estudo de receita; avaliação econômico-social; estudo do modelo de negócios; e avaliação financeira). No item 4.8 são apresentadas as etapas necessárias para realização da avaliação financeira (estabelecimento dos parâmetros operacionais; estabelecimento das premissas financeiras; elaboração da DRE (Demonstração do Resultado do Exercício); definição dos indicadores de rentabilidade financeira; realização da análise de sensibilidade; realização da análise de cenários; e realização da análise de risco). No segundo grupo, do item 4.9 ao 4.11, no item 4.9 são apresentados os resultados da simulação para a implantação de incinerador na cidade do Rio de Janeiro. No item 4.10 são discutidos os principais fatores críticos, e identificadas ações para endereçá-los, para implementação de um projeto de incinerador nos países em desenvolvimento e no Brasil. Por último, no item 4.11 é discorrido sobre a situação atual da incineração de RSU com recuperação energética no Brasil.

O capítulo 5 apresenta a discussão com foco na identificação de ações para abordar os principais desafios identificados para implementação de uma planta de incineração com recuperação energética. Nas considerações finais no capítulo 6 estão apresentados os principais resultados e conclusões alcançados na tese.

Por fim, no capítulo 7 são sugeridas novas pesquisas sobre o tema da tese que poderiam complementar e ampliar as discussões e resultados alcançados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

A revisão bibliográfica apresenta uma contextualização geral sobre a tecnologia de tratamento térmico na gestão de RSU. São apresentadas uma visão geral da geração e composição dos RSU nos países desenvolvidos e em desenvolvimento. Além disso é discutido sobre as alternativas de tratamento e destinação final dos RSU. Em uma visão mais ampla é apresentada a alternativa de tratamento térmico e o processo típico de um incinerador de RSU com recuperação energética. Ao longo da revisão são destacados os aspectos técnicos e econômico-financeiros relacionados à implementação e operação dos incineradores de RSU considerando as plantas já existentes nos países desenvolvidos com uma reflexão para aplicação nos países em desenvolvimento. Por fim, buscou-se um referencial sobre a utilização desta tecnologia nos países em desenvolvimento e os principais motivadores para sua adoção.

2.1 Geração e Composição de RSU nos países desenvolvidos e em desenvolvimento

Desde os anos 1970 a qualidade de vida em países industrializados foi melhorando, resultando na conhecida sociedade de consumo. Em geral, os produtos considerados sem uso ou até simplesmente fora da moda, mesmo se ainda estão em bom estado, viram resíduos. Este consumo tende a ser maior quanto maior a concentração populacional da cidade, resultando em uma maior geração de resíduos por habitante (CAMPOS, 2012; MACHADO *et al.*, 2011). Além disso, podem-se citar outros fatores influenciadores do nível de produção dos resíduos urbanos, como a classe social, a região geográfica e a qualidade de vida (HENRIQUES, 2004). De acordo com Campos (2012), a geração por habitante e a caracterização dos resíduos sólidos tem a ver com o desenvolvimento econômico de um país, assim como o poder aquisitivo e o respectivo consumo da população.

A tendência na geração de RSU em todo o mundo sugere que o volume de resíduos continuará a aumentar, reforçando a possibilidade de usar a incineração como um tratamento que reduz os resíduos que necessitam de aterros, com o benefício adicional de fornecer energia renovável para complementar os fornecimentos convencionais (MAKARICHI *et al.*, 2018). Autores apontam que a geração e composição de RSU está relacionada com o tamanho e a renda econômica da população (COHEN, 2017; UN ENVIRONMENT, 2018). O World Bank (2012a) estima que os resíduos sólidos gerados a partir de áreas urbanas globalmente

aumentarão de aproximadamente 3,5 milhões de toneladas por dia gerados para 6,1 milhões de toneladas por dia até 2025. Na América Latina e no Caribe, as Nações Unidas estimam a geração de 600.000 toneladas por dia até 2025 (UN ENVIRONMENT, 2018).

A quantidade de RSU gerada em todo o mundo é de cerca de 1,3 bilhão de t/ano, com média de aproximadamente 1,2 kg/hab/d e espera-se alcançar 2,2 bilhões de t/ano, com média de aproximadamente 1,5 kg/hab/d (WORLD BANK, 2012a).

O problema dos resíduos não é mais limitado apenas ao aumento da quantidade e respectivo volume, pois temos outro aspecto relevante, que é a variação da composição, reflexo do nosso estilo de vida, que vem mudando significativamente nas últimas décadas (CAMPOS, 2012).

Segundo World Bank (2018a), a geração de resíduos é produto da urbanização, do desenvolvimento econômico e do crescimento populacional, pois à medida que as nações e cidades se tornam mais populosas e prósperas, oferecem mais produtos e serviços à população, acarretando na geração de maiores quantidades de resíduos.

Os problemas gerados pelos RSU vêm crescendo na maioria dos países e, em especial, em determinadas regiões, entre outros fatores, em função do acentuado crescimento demográfico dos centros urbanos (notadamente áreas metropolitanas), assim como da mudança de hábitos de consumo, da melhoria do nível de vida e do nível de desenvolvimento industrial (BARROS JUNIOR *et al.*, 2003; LIMA, 2004).

Nos grandes centros urbanos, assim como as principais regiões metropolitanas do país, a disponibilidade de áreas próximas para aterros sanitários vem reduzindo, elevando os custos de disposição final dos RSU em função do aumento do valor do terreno nas regiões mais próximas aos grandes centros ou pelo aumento das distâncias a serem percorridas. Com isso, passa a haver uma tendência de se avaliar novas alternativas de tratamento e disposição final dos RSU, entre as quais, mas não limitado a essa, se insere a incineração de RSU com recuperação energética, tema principal da presente tese.

A diferenciação entre países “desenvolvidos” e “em desenvolvimento” é estabelecida em função no nível de desenvolvimento econômico e social, do grau de riqueza, do nível de industrialização, do Produto Interno Bruto (PIB), da renda por habitante e do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). Organizações internacionais, como o Banco Mundial, utilizam classificações exclusivamente

numéricas. Nesse caso, o Banco Mundial considera todos os países com renda baixa e média como "em desenvolvimento".

A tabela 1 mostra a comparação das composições dos RSU em alguns países desenvolvidos e em desenvolvimento. Nos países em desenvolvimento, em geral, a composição é dominada por resíduos orgânicos, como por exemplo na Indonésia, Bangladesh, Gana, China e Argélia. A Coreia do Sul seguida pela Polônia, Tailândia e Indonésia têm uma grande parcela de resíduos têxteis, enquanto os resíduos plásticos são dominados pela Malásia, seguida pela China e Tailândia. Em alguns países desenvolvidos, como Estados Unidos da América, Japão e Reino Unido, o papel predomina na composição seguida por resíduos orgânicos, têxteis e plásticos. De acordo com UN ENVIRONMENT (2018), o Brasil é considerado como renda média alta.

Em geral resíduos combustíveis equivalem em média a 89% em países desenvolvidos, e entre 73% e 78% em países em desenvolvimento, mas, apesar disso, a porcentagem de resíduos disponíveis para recuperação de energia pode ser mais alta nos países em desenvolvimento em função de menor percentual de reciclagem (OMARI *et al.*, 2014).

Tabela 01: Composição dos resíduos em diversos países desenvolvidos e em desenvolvimento.

		Composição %								
		País	Combustíveis				Não combustíveis			Outros
			Orgânico	Papel	Plástico	Têxtil	Vidro	Entulho e construção	Metal	
Em desenvolvimento	Renda baixa	Tanzânia	37,0	11,0	7,0	2,0	4,0	8,0	1,0	30,0
		Kenya	52,0	17,3	11,8	5,1	6,7	2,4	2,8	1,9
		Uganda	37,8	6,7	7,8	1,3	0,7	33,6	0,8	11,3
		Argélia	62,0	9,0	12,0	0,0	1,0	0,0	2,0	14,0
		Nigéria	47,0	6,0	10,0	7,0	7,0	18,0	5,0	0,0
		Gana	73,0	6,6	3,3	2,2	1,5	11,2	2,1	0,1
	Renda média	Índia	42,0	30,0	10,4	7,0	5,0	1,5	4,1	0,0
		Nepal	60,0	7,5	12,0	12,0	1,3	6,7	0,5	0,0
		Tailândia	42,7	12,1	10,9	7,3	6,6	6,9	3,5	10,0
		Gaza	54,0	10,0	12,0	0,0	3,0	18,0	3,0	0,0
		Malásia	61,5	16,5	15,3	1,9	1,2	0,4	0,3	2,9
		Bangladesh	68,3	10,7	4,3	2,2	0,7	n/i	2,0	11,8
		Indonésia	70,2	10,9	8,7	6,2	1,7	n/i	1,8	0,5
		Coréia	32,8	23,8	0,0	40,6	2,8	n/i	0,0	0,0
		Filipinas	49,0	19,0	17,0	9,0	n/i	n/i	6,0	0,0
		Polônia	35,0	18,0	11,0	20,0	12,0	n/i	4,0	0,0
	China	67,3	8,8	13,5	4,5	5,2	n/i	0,7	0,0	
		Média	52,4	13,2	9,8	7,5	3,8	9,7	2,3	1,2
	Desenvolvidos	Renda alta	Japão	34,0	33,0	13,0	12,0	5,0	0,0	3,0
USA			13,9	28,5	12,4	8,4	4,6	19,8	9,0	3,4
UK			17,3	21,4	8,8	3,3	9,0	26,6	4,0	9,6
Grécia			42,0	21,0	11,0	17,0	5,4	0,0	3,6	0,0
Alemanha			21,0	31,0	10,0	17,0	16,0	0,0	5,0	0,0
Dinamarca			39,0	23,0	7,0	21,0	6,0	0,0	4,0	0,0
Rússia			34,9	15,0	11,3	4,8	13,7	15,1	4,7	0,5
França			24,0	26,0	13,0	19,0	14,0	0,0	4,0	0,0
Média		28,3	24,9	10,8	12,8	9,2	7,7	4,7	1,7	

n/i: não informado

Fonte: Omari *et al.* (2014).

De acordo com UN ENVIRONMENT (2018), a geração de resíduos urbanos na América Latina e no Caribe em 2014 foi em torno de 541.000 t/d e, considerando a taxa de geração atual (média regional de 1,04 kg/hab/d), em 2050, a geração total pode alcançar até 671.000 t/d. Embora a disposição final adequada de resíduos sólidos na região da América Latina e Caribe tenha melhorado significativamente nas últimas décadas, aproximadamente 145.000 t/d ainda são despejadas em lixões, são queimadas ou descartadas de alguma forma inadequada. Isto equivale aos resíduos gerados por 27% da população regional, ou os resíduos gerados por 170 milhões de pessoas (UN ENVIRONMENT, 2018).

A composição de RSU é heterogênea e variável, sendo influenciada por fatores locais e acaba sendo um fator determinante para seleção do tipo de tratamento de resíduos (COELHO, 2020). Existem diversos tipos de tratamentos para os diferentes tipos e composições de resíduos. As alternativas de tecnologias de tratamento podem ser, em geral, procedimentos físicos, químicos e biológicos que têm o objetivo de reduzir a carga poluidora no meio ambiente, reduzir os impactos sanitários negativos, e promoverem, quando possível, o beneficiamento econômico dos resíduos (LIMA, 2012).

2.2. Tratamento e Destinação de RSU

A gestão de RSU tem se tornado cada vez mais importante nas últimas décadas devido ao crescimento significativo da consciência e preocupação do público com as questões ambientais. O planejamento do sistema de gestão de RSU é, portanto, de importância essencial e geralmente precisa levar em consideração muitos fatores críticos, tais como, os custos de tratamento de resíduos, o potencial impacto ambiental, as emissões de gases de efeito estufa (GEE), a justiça social, a oposição dos residentes (YU e SOLVANG, 2017). Ainda segundo Yu e Solvang (2017), na maioria dos casos, esses fatores estão em conflito entre si e o cenário ideal para um fator pode ser irracional para outros. Uma visão moderna de gestão de resíduos vigente na Europa sugere que o planejamento do sistema de gestão de RSU deve ser tratado como parte do planejamento urbano do município ou da região (GANDOLLA e QUITIAN, 2005; GANDOLLA *et al.*, 2009).

De acordo com Malinauskaite *et al.* (2017), as soluções de gestão de RSU não devem ser apenas ambientalmente sustentáveis, mas também econômica e socialmente aceitáveis, e existem vários fatores que influenciam esse processo complexo, que estão amplamente interligados, sendo, em primeiro lugar, a vontade política e a vontade da sociedade de buscar mudanças. A gestão de resíduos é um campo complexo que vai além da prevenção, coleta, tratamento e eliminação de resíduos, abrangendo um âmbito mais amplo de desenvolvimento socioeconômico, regulamentações governamentais, escolhas de políticas e gestão de recursos (UN ENVIRONMENT, 2019). Trata-se de proteger, preservar e melhorar a qualidade do meio ambiente, da saúde humana, garantir a utilização prudente e racional dos recursos naturais, promover uma economia mais circular, melhorando a utilização dos

recursos e eficiência dessa utilização e, também importante, garantindo a valorização dos resíduos como um recurso (MALINAUSKAITE *et al.*, 2017).

A tabela 2 apresenta uma estimativa dos tipos de tratamento de resíduos de 122 países agrupados por região:

Tabela 02: Tipos de tratamento de resíduos e destinação final nas seis regiões (em porcentagem).

	Destinação final em aterro ou outras disposições	Incineração com recuperação energética	Incineração sem recuperação energética	Outras recuperações (reciclagem e compostagem)	Não contabilizado
Ásia Pacífico	51,2	29,2	1,3	12,9	5,3
Europa	27,5	24,7	2,7	42,9	2,4
Ásia Ocidental	89,5	0,0	0,7	15,5	0,0
Africa	93,1	0,0	1,6	2,3	3,0
América do Norte	54,8	11,2	0,5	33,6	0,0
América Latina e Caribe	91,2	0,1	0,1	6,4	2,4

Fonte: UN ENVIRONMENT (2018).

Segundo World Bank (2018a), os dados de descarte de resíduos são os mais difíceis de agregar, pois muitos países não coletam estes dados de resíduos a nível nacional, trazendo dificuldade para realizar comparações entre níveis de renda e regiões, além do que, nos casos em que os dados estão disponíveis, a metodologia de como o descarte é calculado e as definições usadas para cada uma das categorias muitas vezes não é conhecido ou não é consistente. Alguns países fornecem apenas a porcentagem de resíduos que é enviada para os aterros e, ao restante, é atribuída a categoria "outras" disposições. Em outros casos, os compostáveis e os materiais recicláveis são removidos antes do RSU chegar ao local de descarte e, com isso, não estão incluídos nas estatísticas de eliminação de RSU (WORLD BANK, 2018a).

A incineração de RSU com recuperação de energia, uma das formas de tratamento de RSU, refere-se à combustão de resíduos em condições controladas para reduzir a sua massa e volume, podendo gerar eletricidade e/ou calor. A tecnologia destrói substâncias nocivas, desde que o processo inclua equipamentos de controle de poluição do ar com as melhores tecnologias disponíveis (WORLD BANK, 2018b).

De acordo com World Bank (2018b), a energia gerada é considerada parcialmente renovável, devido ao conteúdo biogênico (vegetal) dos resíduos, como alimentos e outros resíduos orgânicos, papelão e madeira, enquanto os componentes dos resíduos provenientes de combustíveis fósseis (por exemplo, materiais plásticos) não são renováveis. A incineração costumava ser historicamente aplicada sem recuperação de energia, mas isso é cada vez mais raro, dado o potencial da tecnologia para ser uma fonte de energia, além de uma alternativa de gerenciamento de resíduos (WORLD BANK, 2018b).

Embora a tecnologia de incineração de RSU com recuperação energética tenha evoluído nas últimas décadas, ainda é relativamente cara e, portanto, usada mais comumente em países de alta renda (WORLD BANK, 2018b). A tecnologia de incineração de RSU com recuperação energética foi implementada com sucesso em jurisdições com escassez de terrenos (ou aterros), alta capacidade técnica, recursos financeiros significativos, fortes regulamentações ambientais e, normalmente, uma fração baixa ou separada de resíduos orgânicos (WORLD BANK, 2018b).

Mundialmente, em torno de 216 milhões de toneladas de RSU coletados são incineradas por ano (UN ENVIRONMENT, 2018). O tratamento adequado e a destinação final de RSU ainda representam um grande desafio em muitos países, particularmente nos países em desenvolvimento. Os países em desenvolvimento devem manter o foco nos riscos e custos do ciclo de vida dos aterros sanitários e buscar métodos de gestão sustentável de resíduos para substituir as práticas adotadas nesses países (YAN *et al.*, 2020).

Por exemplo, em muitas regiões do Brasil e em outros países da América Latina, na hierarquia da gestão de resíduos, a prioridade deve ser a universalização dos aterros sanitários uma vez que ainda cerca de 40% dos resíduos coletados são dispostos de forma inadequada (UN ENVIRONMENT, 2018). Já nos países desenvolvidos, como decorrência de legislações mais restritivas e condições econômicas mais favoráveis, o tratamento dos RSU tem padrões elevados (EUROSTAT, 2019).

Na União Europeia (UE) a preocupação com a redução e a geração de RSU vem desde 1970, quando teve início a elaboração de Diretivas relativas à geração e gerenciamento dos RSU. O conjunto de regulamentações da legislação europeia englobam: resíduos comuns e perigosos, embalagens e incineração de RSU. Para resíduos, a Diretiva 75/442/CEE é estrutural e exige o gerenciamento do resíduo por

parte dos Estados-membros, incentivando a prevenção e o despejo ambientalmente correto (UE, 1975). A Diretiva 1999/31/EC trata da disposição de resíduos em aterros estabelecendo metas progressivas para a redução da disposição de matéria orgânica biodegradável diretamente nos aterros sanitários (UE, 1999). Para resíduos perigosos, a Diretiva 91/157/CEE estabelece regras para o manuseio (UE, 1991). Para embalagens, a Diretiva 94/62/EC dispõe sobre embalagens e resíduos oriundos de embalagens determinando metas de recolhimento das embalagens (e seus resíduos) colocadas no mercado (UE, 1994). O avanço no gerenciamento de resíduos na UE é suportado por um arcabouço legal, além de incentivo a investimento.

De acordo com World Bank (2018a), mundialmente em torno de 37% dos resíduos são descartados em aterros sanitários, cerca de 19% são submetidos à recuperação de materiais por meio de reciclagem e compostagem, 11% são tratados por meio de incineração moderna e 33% dos resíduos ainda são despejados abertamente.

À medida em que as nações prosperam economicamente, os RSU vêm sendo gerenciados com métodos mais sustentáveis. A construção e a utilização de aterros sanitários costumam ser o primeiro passo em direção ao gerenciamento sustentável de RSU. Enquanto apenas 3% dos RSU são depositados em aterros em países de baixa renda, em torno de 54% dos RSU são enviados para aterros em países de renda média alta (WORLD BANK, 2018a). Os países mais ricos tendem a dar mais ênfase à recuperação de materiais por meio da reciclagem e compostagem e a incineração passa a ser mais comum. Ainda segundo World Bank (2018a), em países de alta renda, em torno de 29% dos RSU são reciclados e 6% são compostados e, em torno de 22% são incinerados, principalmente em países e regiões com elevada concentração populacional e com restrições de terra, como o caso do Japão (WORLD BANK, 2018a).

As práticas de descarte de resíduos variam significativamente por nível de renda e região. O despejo a céu aberto é predominante em países de baixa renda, onde aterros sanitários ainda não estão disponíveis e cerca de 93% dos resíduos são queimados ou despejados em estradas, terrenos abertos ou hidrovias, enquanto apenas 2% dos resíduos são despejados de forma inadequada nos países de alta renda (WORLD BANK, 2018a). Além disso, mais de dois terços dos resíduos são despejados a céu aberto nas regiões do Sul da Ásia e da África Subsaariana, o que

terá um impacto significativo no crescimento futuro de resíduos (WORLD BANK, 2018a).

2.3. Alternativa de tratamento térmico com aproveitamento energético por meio de incineradores

O aproveitamento energético de RSU é uma alternativa promissora no tratamento de resíduos, que também se apresenta como alternativa de geração de energia térmica e/ou elétrica. Embora não se trate de potencial com dimensão suficiente para sustentar uma estratégia de expansão da oferta de energia elétrica no longo prazo, no caso do Brasil, a geração de eletricidade a partir de RSU é elemento importante de uma estratégia regional ou local e, portanto, não deve ser desconsiderada (EPE, 2008).

A viabilidade do emprego da tecnologia de incineração depende da compreensão de que a mesma se constitui uma opção para a solução de problemas ambientais associados ao destino final dos RSU, e não contrariamente, e de forma irreversível, se constitui em uma fonte de outros problemas ambientais. O tratamento térmico de incineração em conformidade com os padrões de emissões ambientais também pode desempenhar um papel na destruição de substâncias orgânicas tóxicas e removê-las do fluxo circular de material (GIZ, 2017).

Apesar de seus altos custos iniciais de investimento, que exigem uma capacidade mínima para obter viabilidade econômica, a incineração de RSU é sugerida como uma alternativa importante a ser considerada para as regiões onde o aterro ainda é a principal rota de descarte de resíduos (FRIEGE e FENDEL, 2011; CUCCHIELLA *et al.*, 2012).

As tecnologias de tratamento térmico de RSU por meio da incineração com recuperação energética são capazes de converter o conteúdo energético de diferentes tipos de resíduos em várias formas de energia valiosa. A energia pode ser produzida e distribuída através de sistemas de rede locais através de energia elétrica, calor ou vapor. O calor pode ser gerado a altas e baixas temperaturas e depois distribuído para fins de aquecimento urbano (calefação) ou utilizado para processos termodinâmicos específicos, em especial em processos industriais (GIZ, 2017).

Segundo Lausselet *et al.* (2016), os incineradores de RSU com recuperação energética são uma alternativa para a energia térmica de combustíveis fósseis pois não são apenas locais de eliminação de resíduos, mas também de recuperação de

energia e recuperação de materiais, assim como os metais. Aproveitar os resíduos para produzir energia também é uma opção atraente para o fornecimento futuro de energia, face ao aumento dos níveis de resíduos pelo aumento da população e da urbanização, e por conta da importância de mitigar as emissões de GEE (Gases do Efeito Estufa) impulsionadas por combustíveis fósseis, e as tecnologias de incineração com recuperação energética mostram-se promissoras em ambas as direções (KOTHARI *et al.*, 2010; TYAGI e LO, 2013; ALQATTAN *et al.*, 2018). Em 2017, a geração bruta de eletricidade a partir de fontes renováveis, nos países da UE, foi de 30,7% do consumo bruto de eletricidade e cerca de 226,6 milhões de TOE¹ foi a produção primária de energias renováveis e biocombustíveis (EUROSTAT, 2019).

A incineração com recuperação energética contribui para a meta de estratégias de energia renovável, reduzindo os impactos ambientais e preservando uso de recursos, em consonância com as metas de desenvolvimento sustentável (FRUERGAARD e ASTRUP, 2011; TURCONI *et al.*, 2011; IEA BIOENERGY, 2013; BRUNNER e RECHBERGER, 2015).

O tratamento térmico com recuperação energética é responsável por 29% e 25% dos RSU incinerados na Ásia-Pacífico e na Europa, respectivamente (WORLD BANK, 2018a). Em mais de 50% em todas as regiões do mundo, exceto uma (Europa), aterros sanitários e depósitos a céu aberto continuam a ser as principais formas de disposição de RSU e, por exemplo, mais de 90 % dos RSU coletados na África e na América Latina e no Caribe são descartados em aterros ou lixões (UNEP, 2018; UN ENVIRONMENT, 2018, WORLD BANK, 2018a).

De acordo com Chen e Wang (2017), na medida em que a quantidade de RSU aumenta, também aumentam os problemas de saúde humana que podem ser rastreados até o tratamento ou descarte insuficiente e/ou inadequado de RSU. No entanto, os RSU gerenciados adequadamente também podem ser uma fonte valiosa de energia recuperada (CHEN e WANG, 2017). Vários estudos foram realizados envolvendo análises de modelagem de energia em plantas de resíduos, mas os projetos devem levar em consideração as dificuldades de adaptação às condições locais e à aceitação do público em certos países (VERGARA e TCHOBANOGLOUS, 2012; BOGALE e VIGANÒA, 2014).

¹ TOE = Tonne of Oil Equivalent. 1 TOE = 42 GJ (Fonte: World Energy Council, 2016)

Em escala global, o mercado de incineração apresenta tendências de crescimento significativas, de 2019 a 2025 é prevista uma taxa de crescimento anual composta de 1,6% (QY RESEARCH, 2019).

2.4. Processo de incineração com recuperação energética

Uma planta de incineração com recuperação energética é composta de área de recebimento, armazenagem e preparação de resíduos, equipamentos de carregamento dos RSU, câmara de combustão, sistema de recuperação de energia, sistema de controle de poluição do ar e sistema de remoção de cinzas e escória (STANTEC, 2011).

A figura 1 resume o fluxo do processo em uma planta de incineração com recuperação energética.

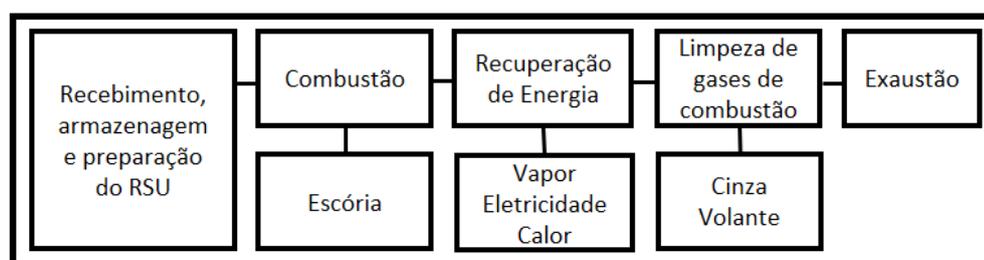


Figura 01: Fluxo do processo em uma planta de incineração com recuperação energética.

Fonte: Adaptado de Stantec (2011).

A tecnologia de incineração de RSU, hoje empregada no mundo, incorpora além dos mecanismos de aproveitamento da energia térmica, o desenvolvimento de sistemas de tratamento e depuração de gases, capazes de controlar, significativamente, a emissão de poluentes atmosféricos, e satisfazer, em geral, aos padrões ambientais de emissão vigentes (EFSTRATIOS *et al.*, 2012).

O tratamento térmico de RSU, por meio das plantas de incineração com recuperação energética, produz vapor de alta pressão, e esse vapor pode gerar energia elétrica, usando uma turbina a vapor, e também produzir diretamente energia térmica. Esse uso duplo é chamado de cogeração que, de fato, possui vantagens ambientais, pois pode substituir os incineradores mais poluentes que ainda existam e ao mesmo tempo fornecer uma vantagem econômica de produzir dois tipos de energia em uma planta (PANEPINTO e ZANETTI, 2018). Além disso, a planta de incineração com recuperação energética é uma opção para reduzir os problemas ambientais associados ao destino final de RSU em lixões e aterros sanitários mal operados

(CUCCHIELLA *et al.*, 2012; GANDOLLA, 2013). Ademais, os incineradores com recuperação energética também desempenham um papel crucial na produção de energia verde (MAISIRI *et al.*, 2015).

A incineração é uma técnica para tratamento essencialmente aplicada para destruição dos resíduos sólidos urbanos em um forno, monitorando a queima a altas temperaturas, que ocorre entre 750 e 1100 ° C (KIM *et al.*, 2013; ALPEREN *et al.*, 2016). O objetivo desta técnica é a degradação e destruição de elementos orgânicos em resíduos sólidos urbanos, com a presença de oxigênio para diminuir a massa e o volume dos resíduos, com conversão em calor e energia (EFSTRATIOS *et al.*, 2012; THI PHUONG *et al.*, 2018). A incineração é capaz de reduzir quase 70% da massa total de resíduos e 90% do volume total (ALPEREN *et al.*, 2016; THI PHUONG *et al.*, 2018).

A combustão em fornos de grelha está em uso há mais de 130 anos e é a mais utilizada mundialmente dentre as tecnologias térmicas de incineração com recuperação energética (STANTEC, 2011; IEA BIOENERGY, 2013; LOMBARDI *et al.*, 2015; MARTIN *et al.*, 2017). Na Europa, 90% das plantas de incineração com recuperação energética usam incineração em fornos de grelha (IEA BIOENERGY, 2013).

Em um forno de grelha, os resíduos são introduzidos por meio de uma calha de alimentação e, em seguida, empurrados para a câmara de combustão por um aríete hidráulico ou uma grelha móvel. Segundo WSP (2013), existem vários projetos de grelhas diferentes em operação, mas sua função principal é o transporte controlado dos resíduos dentro da câmara de combustão. Destarte, o projeto deve garantir uma mistura eficiente do leito de combustível e cobertura permanente das partes metálicas para protegê-las contra superaquecimento. Existem quatro tipos principais de grelha, são elas (WSP, 2013): (i) recíproco para a frente; (ii) inverso recíproco; (iii) rolo; e (iv) horizontal.

Em todas as grelhas, o ar primário é injetado abaixo das mesmas. À medida em que os resíduos são secos e queimados, os voláteis remanescentes são posteriormente queimados acima da grelha, com a ajuda da mistura adequada dos gases com o ar excessivo (STANTEC, 2011). A grelha de combustão é projetada para ter comprimento suficiente para permitir que os resíduos restantes entrem em combustão total antes de a escória ser descarregada para fora do forno (WSP, 2013).

Os gases quentes produzidos no forno de combustão passam para uma caldeira onde a energia é recuperada por transferência de calor para formar vapor superaquecido dentro de tubos de água. Os gases seguem para um sistema de controle de poluição do ar (*Air Pollution Control - APC*) para serem limpos, onde poluentes como gases ácidos, óxidos de nitrogênio (NOx), metais e dioxinas / furanos são removidos antes que o gás de combustão resfriado seja emitido para a atmosfera, através de uma chaminé (WSP, 2013).

O vapor superaquecido gerado na caldeira aciona uma turbina a vapor para gerar energia elétrica. Dois tipos de resíduos sólidos são gerados pelo processo de combustão, escória de fundo na câmara de combustão do incinerador e resíduos do controle de poluição do ar (APC) (WSP, 2013). Uma descrição genérica de um processo de incineração é representada na figura 2.

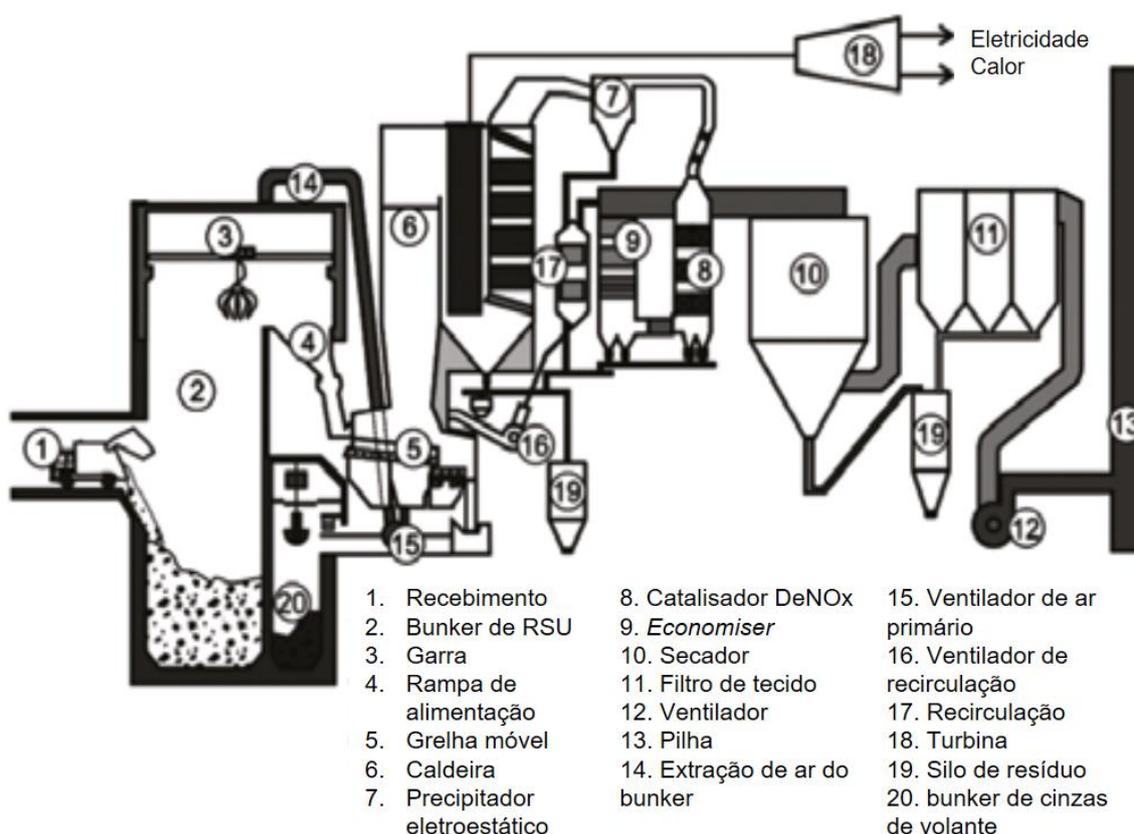


Figura 02: Descrição genérica de um processo de incineração.

Fonte: Adaptado de World Energy Council (2016).

Apesar de o item 1 da figura 2 representar chegada de resíduos por modal rodoviário (caminhões) conforme figura 3, os resíduos podem chegar pelo modal

ferroviário (trem), conforme figura 4, ou fluvial (por balsas ou barcaças) como no incinerador em Genebra na Suíça.



Figura 03: Área de descarregamento dos resíduos no fosso via modal rodoviário em Zurique.
Fonte: Visita técnica do autor no incinerador Zurique na Suíça (2017).

O modal fluvial utilizado no incinerador SIG em Genebra na Suíça chega a 17 barcaças por semana e representa 30% do total de RSU recebido pela planta.



Figura 04: Recebimento de resíduos via modal ferroviário em Lausanne.
Fonte: Visita técnica do autor no incinerador de TRIDEL em Lausanne na Suíça (2017).

O sistema de controle dos incineradores modernos é bastante sofisticado e possibilita um gerenciamento de alto nível da operação. A figura 5 mostra a sala de controle do incinerador de Genebra.



Figura 05: Sala de controle do incinerador de Genebra.

Fonte: Visita técnica do autor no incinerador SIG em Genebra na Suíça (2017).

Antes de passar pela fase de combustão, os resíduos que chegam podem ser expostos ao pré-tratamento, dependendo de sua qualidade, composição e do sistema de incineração selecionado. Os resíduos são descarregados em um fosso (*bunker*) de RSU, que normalmente é grande o suficiente para armazenar quantidade para suprir a planta por mais de uma semana conforme figura 6.



Figura 06: Área de armazenagem de resíduos (fosso).

Fonte: Visita técnica do autor no incinerador ERZO em Oftringen na Suíça (2017).

Guindastes rolante com garras aéreas (capazes de sustentar cerca de 3 toneladas), conforme figura 7, carregam os resíduos sólidos para o funil/rampa de alimentação do forno de incineração com recuperação energética, e um alimentador na parte inferior da tremonha empurra os resíduos para a grelha móvel que pode ser inclinada ou horizontal.



Figura 07: Guindaste rolante em operação no fosso de armazenagem dos resíduos.
Fonte: Visita técnica do autor no incinerador da TRIDEL Lausanne na Suíça (2017).

O movimento mecânico da grelha e a força da gravidade, no caso de uma grelha inclinada, movimentam os resíduos através da câmara de combustão. A grelha tem 3-12 metros de largura dependendo da capacidade do forno, e aproximadamente 8 metros de comprimento. A temperatura média da caldeira está entre 1.000 ° C e 1.200 ° C e, em média, os resíduos levam cerca de uma hora para passar pela grelha. No caso de resíduos mistos, é necessária uma temperatura de forno de 1.050 ° C (HULGAARD e VEHLLOW, 2011).

Por definição, a incineração de resíduos é realizada com excesso de ar, para assegurar a quantidade de oxigênio necessária à queima dos resíduos. Por causa das preocupações de emissão e segurança, existe uma certa faixa de temperatura que é exigida para este tipo de processo (HULGAARD e VEHLLOW, 2011).

A oxidação a alta temperatura na câmara de combustão reduz resíduos a escória, que é descarregada na extremidade inferior da grelha. A altura do forno acima da grelha é de cerca de 20 metros para que os gases permaneçam de 4 a 8 segundos dentro da câmara de combustão (MAVROPOULOS, 2010).

Uma central hidráulica comanda os macacos de avanço do alimentador e as filas móveis da grelha de combustão. Em algumas plantas de incineração, ureia ou

amônia são injetadas no forno para reduzir as emissões de óxidos de nitrogênio. A câmara de pós-combustão é o elemento revestido em material refratário. A câmara de pós-combustão é especialmente concebida para garantir a combustão completa dos gases e é mais estreita no ponto em que é introduzido o ar secundário. A emissão de ar deve acontecer a uma elevada velocidade para favorecer uma mistura energética dos gases (MAVROPOULOS, 2010).

A emissão de ar orientada sob a grelha (ar primário) permite o desenvolvimento em sucessão das três fases da combustão: secagem, desgaseificação, gasificação. Os gases queimam completamente graças à entrada de ar secundário na câmara de pós combustão, colocada a montante da grelha (MAVROPOULOS, 2010). Os resíduos são empurrados de um alimentador na zona primária da grelha, dita zona de secagem, onde são dispersos e secados pela passagem de ar comburente e irradiação intensa das flamas. Na segunda e terceira zonas da grelha acontece a combustão propriamente dita, mediante a insuflação de ar comburente através da mesma. A última zona é destinada ao final da combustão e o excesso de ar assegura a combustão completa (CHIRICO, 1996). A escolha do tipo de caldeira está estritamente relacionada à escolha do uso final desejado da energia produzida (WORLD ENERGY COUNCIL, 2016).

De acordo com Gandolla (2013), após concluída a combustão, as escórias incandescentes caem da extremidade da grelha, através do poço para escórias, em um canal metálico com água e munido de um transportador com correias inclinadas. As correias deslizam lentamente de modo a permitir o deslocamento das escórias. Tal canal desempenha as seguintes funções:

- Resfriar e avançar as escórias em direção do local de armazenamento das escórias;
- Assegurar a continuidade da câmara de combustão;
- Funcionar como válvula de segurança em caso de sobre pressão da câmara de combustão.

Os gases que saem da câmara de pós combustão usualmente seguem para uma caldeira. A água nos tubos nas paredes da caldeira torna-se vapor superaquecido à medida que o calor contido nos gases de combustão é transferido. Este vapor de alta pressão aciona uma turbina que gera eletricidade. O vapor de baixa pressão do escape do gerador pode ser usado para aquecimento urbano ou condensado para ser

usado como água quente. As plantas de incineração com recuperação energética mais eficientes são co-geradores de eletricidade (> 0.6 MWh) e aquecimento urbano (> 0.5 MWh por tonelada de RSU processada) (MAVROPOULOS, 2010).

Com relação ao tratamento dos gases do processo de incineração, os mesmos são limpos em um sistema de controle de poluição do ar (*Air Pollution Control - APC*) antes de serem liberados na atmosfera. O sistema de limpeza de gases de combustão (que pode ser projetado de diferentes maneiras - de filtros a precipitadores eletrostáticos) e uma série de ventiladores asseguram tanto um processo de combustão correto quanto emissões controladas. No entanto, haverá uma certa porcentagem de substâncias emitidas na atmosfera, dependendo da composição do RSU e do tipo de sistemas de limpeza usados (WORLD ENERGY COUNCIL, 2016).

De acordo com Mavropoulos (2010), os sistemas APC nas plantas de incineração com recuperação energética estão entre os mais avançados de todos os processos industriais de alta temperatura e consistem em injeção de ureia ou amônia, lavadores a seco ou semi-seco com hidróxido de cálcio, SO₂ (dióxido de enxofre) e HCl (ácido clorídrico), injeção de carvão ativado para adsorção de moléculas metálicas orgânicas e voláteis e filtro manga para remoção de material particulado. Os gases já resfriados e neutralizados passam então por um sistema de filtro (manga) que retiram o material particulado (fuligem, sais e hidróxido de cálcio) de dimensão de até 0,3 μm^2 . Em algumas conformações utilizam-se outros sistemas, como precipitadores eletrostáticos, lavadores Venturi, ciclones, etc. (MAVROPOULOS, 2010).

Os resíduos do APC, que incluem cinzas volantes, carbono, cal e dioxinas e furanos são resíduos perigosos. Destarte, os resíduos da APC na UE são normalmente eliminados em aterros específicos, armazenado em minas de sal ou usado para neutralização de resíduos ácidos. A escória é a outra principal saída de resíduos de incineradores de RSU. Após análises específicas, caso a escória atenda a legislação local, pode ser usada na construção de estradas, pavimentos e ou similares (FORTEZA *et al.*, 2004).

Quantidades consideráveis de metais ferrosos e não ferrosos podem ser recuperados da escória. As escórias de um processo de extração a seco, em vez de

² De acordo com o Sistema Internacional de Unidades um μm (*micrômetro*): é uma unidade de comprimento do Sistema Internacional de Unidades (SI) definido como 1 milionésimo de metro (1×10^{-6} m) e equivalente à milésima parte do milímetro (Fonte: INMETRO, 2012)

um processo típico de extração úmida, para o incinerador SIG na Suíça obteve, em média, 11% de ferro, 2,2% de alumínio, 0,5 de cobre e 0,003% de ouro (SIGG, 2012).

As eficiências para o processo de incineração descrito, em termos de produção de energia, são tipicamente em torno de 20-25% se operando no modo CHP (*Combined Heat and Power*) e até 25-35% no caso de produção de energia apenas. O tamanho das plantas de cogeração pode variar significativamente, tanto em termos de capacidade de entrada de resíduos como de produção de energia (ENERGINET, 2012).

Uma boa referência de tecnologia de incineração com recuperação energética disponível é o incinerador da Afval Energie Bedrijf em Amsterdã na Holanda, em operação desde 2007, por ser um dos maiores do mundo em operação (114,2 MW), com capacidade de processar 1,5 milhão de toneladas de RSU por ano e com uma eficiência de geração de eletricidade de 30% (ENERGINET, 2012).

De acordo com World Energy Council (2016), a diferença econômica mais importante entre as tecnologias de incineração com recuperação energética e outras unidades de geração de energia baseadas na combustão está estritamente relacionada com a natureza do combustível de entrada. O RSU é geralmente regulado por taxas pré-fixadas de recebimento (ou *gate fee*), e é geralmente considerado como a principal fonte de renda para os proprietários das plantas de incineração com recuperação energética. A geração de eletricidade e calor pode ser considerada como um subproduto útil, com ganhos adicionais que podem, inclusive, serem superiores ao ganho do *gate fee*. Em diversos países na UE, a distribuição de energia das unidades de incineração com recuperação energética é priorizada em relação a outras unidades geradoras, proporcionando assim uma forma de receita garantida durante todas as operações (WORLD ENERGY COUNCIL, 2016).

2.5 Incineração nos países desenvolvidos

A incineração de resíduos tem o potencial de reduzir o volume e a massa de resíduos em 80% a 90% e 70% a 80%, respectivamente, reduzindo assim o uso de área para a disposição dos resíduos que é escassa em países desenvolvidos como os da Europa e o Japão (TABASOVA *et al.*, 2014; LOMBARDI *et al.*, 2015). Nos países desenvolvidos, os incineradores com recuperação energética já são uma alternativa estabelecida para o tratamento de RSU, motivada tanto pela necessidade de reduzir

os gases do efeito estufa (GEE) minimizando uso de aterros como pelo objetivo de aumentar a participação de energia renovável (GOHLKE, 2009).

Em países desenvolvidos, as plantas de incineração com recuperação energética operam sob regulamentos rigorosos de emissão com altas tecnologias com redução das emissões nocivas em comparação aos produzidos no início dos anos 90 (PORTEOUS, 2015; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017).

Um dos principais fatores que sustentou o crescimento das plantas de incineração com recuperação energética nos países em desenvolvimento foi a evolução da tecnologia de tratamento nas emissões do processo de incineração. Atualmente, as plantas de incineração com recuperação energética na Europa operam sob normas rígidas de controle de emissão, utilizando tecnologias consideradas “estado da arte” em comparação com as tecnologias que eram utilizadas décadas atrás (MALINAUSKAITE *et al.*, 2017).

A recuperação de energia a partir do tratamento térmico de resíduos começou com o primeiro incinerador sendo construído nos Estados Unidos em 1885. Em 2014, o número de incineradores de RSU com recuperação energética no mundo chegou a 1.605, sendo 512 plantas na Europa, 822 plantas no Japão, 75 nos Estados Unidos e 166 na China (WTERT, 2014; ETC/SCP, 2014; ZHANG *et al.*, 2015). Mais de 80% das plantas de incineração com recuperação energética ativas em todo o mundo estão localizadas nos países desenvolvidos, liderados pelo Japão e seguidos da Alemanha, França e Estados Unidos. Na Europa, Alemanha, França e Reino Unido são os países líderes na recuperação de energia de RSU (SCARLAT *et al.*, 2019). A Europa com mais de 500 incineradores de RSU com recuperação energética, ou plantas WtE (Waste-to-Energy), possuem uma geração potencial acima de 35 milhões de MWh de energia por ano (CEWEP, 2017).

Do total de 258 milhões de toneladas de RSU gerados pelos Estados Unidos ao ano, 53% são depositados em aterros, 34% são reciclados e compostados e 13% são incinerados (SCARLAT *et al.*, 2019). Esses 13% passam por incineradores com recuperação energética e produzem 14.310,2 GWh de eletricidade (USEPA, 2019). Os Estados Unidos têm em torno de 75 incineradores com recuperação energética em operação, entretanto, 10 anos atrás, eram 87 plantas ativas. Além disso, dois incineradores estavam programados para encerrar operação em 2020. Em geral, esses incineradores que foram desativadas são plantas de menor porte e mais antigas, mas a principal causa de desativação são os baixos preços de venda de

eletricidade, que é uma receita importante para viabilidade econômica do incinerador (SCARLAT *et al.*, 2019). Nos EUA, apenas um novo incinerador está previsto entrar em operação no Condado de Palm Beach na Flórida, sendo a primeira nova planta no país nos últimos 15 anos. Segundo SCARLAT *et al.* (2019), nos Estados Unidos o aterro sanitário é uma opção mais viável, devido ao menor custo econômico em comparação com o incinerador de RSU e pela disponibilidade de área do país.

Enquanto isso, no Japão a incineração de RSU é predominante em função da baixa disponibilidade de terra. A UE, assim como o Japão, tem adotado uma hierarquia para gerenciamento dos RSU e no que se refere à disposição final, primeiro, é preferível a redução da geração de resíduos, depois a reciclagem, em seguida a incineração e, só em último caso, o envio para aterros sanitários (DYKGRAAF e VOLLEBERGH, 2004).

O Japão começou a utilizar a incineração a partir de 1960. Os incineradores no Japão são de pequena capacidade. O Japão dispõe de 822 incineradores com recuperação energética e apenas 3% dos RSU vão para aterros sanitários (WTERT, 2014; USEPA, 2019).

2.6 Incineração nos países em desenvolvimento

A incineração de RSU com recuperação energética tem recebido atenção significativa nos países em desenvolvimento, em especial pelos benefícios com a redução do volume de resíduos e geração de energia. No mundo, mais de 200 plantas de incineração estão em construção e estarão operacionais entre 2020 e 2023, sendo boa parte nos países em desenvolvimento na Ásia-Pacífico, incluindo China, Tailândia, Filipinas, Indonésia e Mianmar (UN ENVIRONMENT, 2018).

Na medida em que a discussão atual sobre a necessidade de implementação de tecnologias de tratamento dos resíduos sólidos urbanos vem ganhando força nos países em desenvolvimento, os incineradores de RSU com recuperação energética têm sido vistos como uma alternativa de solução para os problemas derivados do aumento da quantidade de resíduos nas grandes cidades, bem como das crescentes demandas de energia (GIZ, 2017). Embora o processo de transferência de tecnologia de países desenvolvidos para os em desenvolvimento seja ainda muito lento, há um início de movimento para instalação de incineradores com recuperação energética na América Latina (UN ENVIRONMENT, 2018).

As únicas plantas de incineração na América Latina e no Caribe estão

localizadas em locais sob jurisdição europeia: Bermuda (britânica), Martinica (francesa) e São Bartolomeu (francesa). A única planta de incineração da África está na Etiópia e não há incineradores operacionais na Ásia Ocidental. (UN ENVIRONMENT, 2018)

Países como a China vêm tendo crescimento do tratamento térmico com recuperação energética, no entanto, a maioria dos RSU ainda é depositada em aterros, entretanto, entre 2013 e 2014, a capacidade total de incineração de RSU atingiu 46 milhões de toneladas por ano e a geração de energia 18,7 bilhões de kWh, representando 1,2% da produção total de energia renovável (SCARLAT *et al.*, 2019). A tecnologia de incineração de resíduos foi introduzida na China no final da década de 1980 e o número de instalações de incineração aumentou significativamente desde então (SCARLAT *et al.*, 2019). A China tem o mercado de crescimento de incineração de RSU mais rápido entre os países em desenvolvimento (UN ENVIRONMENT, 2018). Estima-se que até final da próxima década mais de 50 por cento do RSU da China será tratado em plantas de incineração e chegará a mais de 400 plantas em operação (CHI, 2017).

O governo da China tem dado apoio político ao desenvolvimento de energia renovável tendo um investimento em incineração de RSU com recuperação energética que representou 56% do investimento total em energia renováveis do ano de 2014, estimulado pelo plano nacional de gestão de resíduos (LI *et al.*, 2015). Na política de financiamento para grandes projetos de proteção ambiental, o governo Chinês geralmente exige que os investidores privados contribuam com 30% do investimento de capital inicial do projeto, sendo o restante passível de ser obtido por meio de subsídios e/ou empréstimos de bancos nacionais, além da isenção de 5% no imposto de renda (ZHANG *et al.*, 2015). Outro incentivo do Governo Chinês está na prioridade à compra de energia elétrica fornecido pela planta de incineração. Além disso, os governos locais subsidiam a incineração de RSU com recuperação energética com valores de 9,3 US\$ / tonelada a 14,3 US\$ / tonelada (LI *et al.*, 2015). As somas desses incentivos auxiliam aos projetos obterem a viabilidade econômica financeira.

Apesar desses numerosos incentivos econômicos na China, os incineradores ainda não podem cobrir seus custos totais, particularmente os custos sociais e de saúde, que são externalizados por meio da saúde pública e para os cidadãos individuais (ZHAO, 2017). Os incentivos aos incineradores de RSU na China são uma oportunidade para mitigar os altos custos iniciais de construção, mas ainda são

preocupantes em termos de atingimento dos valores limite de emissões da União Europeia.

Em 2014, o governo Chinês, em função dos problemas gerados com as dioxinas e furanos oriundas dos incineradores, reduziu o limite de emissões de dioxinas de 1,0 para 0,1 ng TEQ / Nm³ (ZHANG *et al.* 2015). Entretanto, na China, assim como na Índia, embora existam padrões nacionais de emissão para incineração de RSU, os requisitos são menos rígidos do que os padrões da União Europeia conforme apresentado na tabela 3 (listagem não exaustiva). Emissões excessivas de dioxinas dos incineradores foram registradas na China e também na Índia. NI *et al.* (2009) apontaram que das emissões de dioxinas de 19 incineradores de RSU na China, 78% ultrapassavam os limites de controle europeu.

Tabela 03: Padrões de emissão para incineradores de RSU em diferentes países.

Poluente	Unidade	Melhores Técnicas Disponíveis Níveis de Emissão	UE - Diretiva de Emissões Industriais 2010/75/EC	Padrão Nacional da China GB18485-2014	Padrão Nacional da Índia
Material particulado	mg / Nm ³	1-5	10	30	50
Cloreto de hidrogênio	mg / Nm ³	1-8	10	60	50
Fluoreto de hidrogênio	mg / Nm ³	<1	1	-	4
Dióxido de enxofre	mg / Nm ³	1-40	50	100	200
Óxidos de nitrogênio	mg / Nm ³	120-180	200	300	400
Monóxido de carbono	mg / Nm ³	1-10	50	100	100
Carbono orgânico	mg / Nm ³	5-30	10	-	20
Mercúrio	mg / Nm ³	0,001-0,002	0,05	0,05	0,05
Cádmio	mg / Nm ³	0,005-0,05	0,05	0,1	0,05
Chumbo	mg / Nm ³	0,005-0,5	0,5	1	0,5
Outros metais	mg / Nm ³	0,005-0,5	0,5	-	-
Dioxinas e furanos	ng / Nm ³	0,01-0,1	0,1	0,1	0,1
Amônia	mg / Nm ³	<10	n/a	n/a	n/a

n/a = não aplicável. “-“ = sem limite de emissão.

Fonte: UN ENVIRONMENT (2019).

2.7. Histórico da incineração de RSU no Brasil

Na presente seção foi mantido a aplicação do termo “incinerador”. Apesar da aplicação do termo “incinerador”, o histórico de tratamento térmico histórico no Brasil deveria ser associado ao termo “queimadores”. No Brasil, o primeiro incinerador (queimador) foi construído na cidade de Manaus, em 1896, pelos ingleses e tinha capacidade para processar 60 toneladas por dia de resíduos. Esta planta foi desativada em 1958 por não mais atender às necessidades locais e por problemas de manutenção. Em São Paulo, em 1913, foi instalado um incinerador especial, com capacidade para 40 toneladas por dia de resíduo, provido de um sistema de rudimentar de recuperação de energia (uma caldeira e um alternador), que devido a problemas de adaptação à rede elétrica foi desativado e substituído por motores elétricos convencionais. Este último foi desativado em 1949 e demolido em 1953. (CETESB, 2018)

As tecnologias tanto desses primeiros incineradores no Brasil, quanto daqueles que foram instalados em São Paulo em 1959 e 1967, na região de Vergueiro e no Bom Retiro, respectivamente, eram antigas e não atendiam aos padrões de controle de poluição exigidos pela legislação vigente. Na década de 1950, com o surgimento da construção de prédios de vários pavimentos nas cidades de maior porte foram implantados vários incineradores prediais para queimar o resíduo gerado nos apartamentos, porém foram banidos entre 1969 e 1970 por não possuírem nenhum controle do processo de incineração (HENRIQUES, 2004).

Os primeiros incineradores no Brasil se enquadravam dentro da primeira geração, com tecnologia ultrapassada, cuja função principal das plantas era reduzir o volume do resíduo, sendo que os gases gerados eram lançados diretamente na atmosfera, sem tratamento. Por esse motivo, o termo mais apropriado para os mesmos seria queimador. Nos dias atuais, diante das exigências da legislação ambiental e da mobilização da opinião pública por meio de entidades ambientalistas, são inconcebíveis tais sistemas. Inclusive esse histórico contribuiu para uma percepção negativa da sociedade para com os atuais incineradores.

A implantação de incineradores no Brasil teve maior projeção para o tratamento de resíduos classificados como especiais (aeroportuários, hospitalares e industriais). Com isso, verifica-se que o tratamento térmico no país ainda se caracterizou pela grande quantidade de incineradores de pequeno porte, destinados principalmente à

queima de resíduos de serviços de saúde, os quais operam muitas vezes de forma precária, sem manutenção adequada e sem controle das emissões atmosféricas (CETESB, 2018).

Em função da tecnologia de incineração inicialmente empregada no mundo, a partir do início do século passado, não contemplar o controle da emissão de gases poluentes, problemas ambientais relacionados à poluição do ar foram de fato a ela associados, influenciando, negativamente, seu maior desenvolvimento. Observa-se que em todo o mundo, e inclusive no Brasil, o imaginário popular sobre a tecnologia de incineração sempre a associou, e continua a associando a uma fonte de emissão de gases poluentes (HENRIQUES, 2004). No Brasil o processo de tratamento térmico ganhou o conceito de poluidor, nocivo à saúde e prejudicial ao meio ambiente devido ao uso de equipamentos obsoletos ou à operação e manutenção inadequadas. Esta visão negativa ainda é marcante para grande parte da população brasileira.

O desenvolvimento mais recente da tecnologia, incluindo a modernização dos sistemas de controle e tratamento de gases poluentes, no que se considera como quarta geração, promoveu um ambiente para a maior aceitabilidade de unidades de incineração baseadas em tecnologia moderna de incineração com recuperação energética (GIZ, 2017).

Atualmente são diversos os países que a utilizam como solução para a disposição final e de aproveitamento energético de RSU (UN ENVIRONMENT, 2019). Ademais, os processos de licenciamento ambiental se dedicam principalmente a assegurar o rigoroso controle das emissões atmosféricas.

2.8. Estudos de viabilidade para plantas de incineração

Diversos autores forneceram estudos relacionados à viabilidade de plantas de incineração de RSU com recuperação energética para regiões específicas: Taiwan (CHEN e WANG, 2017), Noruega (LAUSSELET *et al.*, 2016), Índia (BHADA e THEMELIS, 2008), Reino Unido (NIXON *et al.*, 2013), Irã (TEHRANI e HAGHI, 2015), Grécia (PSOMOPOULOS *et al.*, 2014) e para um município de pequeno porte na África do Sul (MAISIRI *et al.*, 2015). Além disso, uma análise de custo-benefício de um incinerador de RSU em pequenas ilhas de Montevidéu foi estudada por Rodriguez (2011). Considerando análises financeiras mais específicas, os aspectos econômicos do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos em um sistema de gestão de resíduos sustentável foram estudados por Massarutto (2015).

Com relação a guias/referencias para realização de estudos de viabilidade, o Banco Mundial publicou um guia para tomadores de decisão sobre tecnologias de gestão de resíduos sólidos urbanos (WORLD BANK, 2018b). Com relação ao aspecto financeiro, o Banco Asiático de Desenvolvimento forneceu um conjunto de diretrizes para a análise econômica de projetos (ASIAN DEVELOPMENT BANK, 2017) e a Comissão Europeia forneceu um guia/ferramenta para a análise de custo-benefício na avaliação econômica de projetos de investimento (EUROPEAN COMMISSION, 2014). Com enfoque direcionado para países em desenvolvimento, a Sociedade Alemã para Cooperação Internacional forneceu um guia para tomadores de decisão em países em desenvolvimento e emergentes para utilização de incinerados na gestão de resíduos sólidos urbanos (GIZ, 2017). No Brasil temos a portaria nº 557, referência para esta pesquisa, que institui normas de referência não obrigatórias para a elaboração de estudos de viabilidade técnica e econômico financeira (EVTE) (BRASIL, 2016).

3. METODOLOGIA:

A abordagem metodológica do estudo realizado partiu de uma revisão bibliográfica sobre incineração de resíduos sólidos urbanos com recuperação energética; sobre a análise dos estudos de viabilidade técnica e econômica de implantação de incineradores, incluindo os aspectos legais e as formulações consideradas em estudos desta natureza no país. Na sequência para o estabelecimento de um *benchmarking*³ foram realizadas visitas de campo em incineradores na Europa.

3.1. Revisão Bibliográfica

A formulação de um quadro teórico como base para o estabelecimento da proposta de desenvolvimento do estudo decorreu de uma revisão bibliográfica sobre o tema de incineração de RSU com recuperação energética e os vários aspectos relacionados a estudos de viabilidade deste tipo de empreendimento, tendo sido consultados livros, artigos científicos e documentos técnicos, entre relatórios de agências ambientais e legislações. Foram feitas buscas nas principais bases

³ Método de aprendizado que significa comparar-se e aprender com os melhores, adaptando as práticas e os resultados à realidade da organização, com melhorias significativas (Fonte: Leibfried e Kathleen, 1994).

científicas como Science Direct, Web of Science, Scopus, Periódicos CAPES, entre outros. As buscas foram feitas com o uso de descritores: *WtE, incineration, economic viability of WtE plants, financial viability of WtE plants EU legislation, developing countries*, legislação para incineradores, incineração de RSU, incineração de RSU com aproveitamento energético, *technical and economic feasibility study of MSW incinerators e MSW incinerators*. Também foram feitas buscas sobre as normas e legislações brasileiras vinculadas ao tema, além dos sites especializados em incineração (CEWEP, site dos incineradores, etc.).

3.2. Modelo de Viabilidade Técnica, Econômica e Financeira

A metodologia proposta para o modelo de estudo de viabilidade foi baseada na portaria nacional nº 557, de 11 de novembro de 2016 (BRASIL, 2016), que estabelece referências para a elaboração de estudos de viabilidade técnica e econômico-financeira (EVTE) previstos no art. 11, inciso II, da Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007 - Lei Nacional de Saneamento Básico (LNSB) (BRASIL, 2007). Tendo como base a portaria nacional nº 557 (BRASIL, 2016) e o Guia de Análise de Custo-Benefício (CBA) de projetos de investimento da Comissão Europeia, que oferece orientações práticas sobre avaliações de grandes projetos (EC, 2014), foram elencadas as 8 principais etapas necessárias para orientar uma avaliação técnico-econômica para implementação de um projeto de uma planta de incineração de RSU com aproveitamento energético. As etapas propostas para realização de um estudo de viabilidade técnico-econômica estão apresentadas na figura 8.

1	2	3	4	5	6	7	8
Estudo da Regionalização	Estudo da Demanda	Estudo do Valor dos Investimentos	Estudo dos Custos e Despesas	Estudo da Receita	Avaliação Econômico-social	Estudo do Modelo de Negócio	Avaliação Financeira

Figura 08: Etapas para realização de estudo de viabilidade técnico-econômica.

Fonte: Adaptada Portaria nº 557 (BRASIL, 2016).

Inicialmente, foi necessário estabelecer as bases para o estudo de viabilidade simulado para o projeto de instalação do incinerador de RSU com aproveitamento energético para o município do Rio de Janeiro. Foi realizada uma avaliação do porte e do desempenho requerido para a planta, bem como estabelecidos os fatores básicos

do projeto, o rendimento da planta, a composição e o poder calorífico do RSU de entrada.

Os dados de composição de RSU foram obtidos junto a Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (COMLURB). As informações fiscais foram baseadas nas leis aplicáveis de acordo com os decretos nacionais vigentes. Os valores de referência das emissões atmosféricas foram baseados na resolução da Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA 079/2009) e na Resolução nº 316 do CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 2002a).

Na aplicação do modelo teórico de análise econômico-financeira na simulação para o município do Rio de Janeiro, foram calculados o valor presente líquido (VPL), o *payback* simples (SPB), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o retorno sobre o investimento (ROI). Esses são indicadores de viabilidade econômica simples e amplamente usados para a avaliação preliminar de projetos (ENERGY MANAGEMENT, 2014). O orçamento de capital da planta (CAPEX - *CAPital EXpenditure*) foi projetado para uma vida útil de 30 anos, de acordo com os projetos das plantas das visitas técnicas. Esse tempo de vida foi utilizado nos cálculos de VPL, SBP, TIR e do ROI.

Foram identificadas as principais variáveis que afetam a performance financeira da receita e realizadas análises de sensibilidade do VPL, TIR e ROI para essas variáveis. Uma escala de atratividade de investimento foi formulada para permitir uma análise matricial dos resultados da análise de sensibilidade do VPL, TIR e ROI onde (ENERGY MANAGEMENT, 2014; MAISIRI *et al.*, 2015):

- Um valor de VPL inferior a zero é considerado inviável financeiramente. Um valor de VPL entre zero e um quarto do custo de capital (CAPEX) é considerado financeiramente viável, mas não atraente. Um valor de VPL atraente e financeiramente viável é de mais de um quarto e menos da metade do custo de capital. O VPL mais atraente é maior do que a metade do custo de capital.
- Uma TIR inferior a 10 % não é considerada financeiramente viável. Uma TIR entre 10% e 15% é considerada financeiramente viável e atraente. Um valor de TIR superior a 15% tem a maior atratividade de investimento.

- Um ROI inferior a 0 % não é considerado financeiramente viável. Um ROI entre 0% e 20% é considerada financeiramente viável, mas não atraente. Um valor de ROI superior a 20% é considerado financeiramente viável e atraente.

Um cenário base foi estabelecido considerando os valores de investimentos, custos, despesas e receitas mais prováveis. Uma análise de cenários com dois cenários diferentes foi formulada considerando a variação da taxa de juros de empréstimo bancária e do nível do custo de capital (CAPEX). O primeiro cenário considera uma taxa de empréstimo bancária de juros mais baixa do que é atualmente aplicado em projetos similares no Brasil. O segundo cenário considera uma redução no custo de capital (CAPEX) para o caso de adoção de algum tipo de incentivo fiscal pelo poder público ou na possibilidade de utilização da tecnologia chinesa que possui CAPEX inferiores aos da Europa. Ambos os cenários foram comparados ao cenário base. Os cenários foram classificados (ranqueados) de acordo com o desempenho em termos de VPL, SBP, TIR e ROI.

3.3. Projeto Base

As bases para a adequação do modelo para incinerador de RSU foram estabelecidas a partir de um referencial teórico, através de pesquisa bibliográfica, e do levantamento de dados obtidos através das visitas técnicas (*benchmarking*) realizadas em 2017 e 2018 a quatro incineradores de RSU na Suíça (WtE SIG Genebra, WtE Tridel Lausanne, WtE Zurique Hagenholz e WtE ERZO Oftringen) e dois em Portugal (WtE Valor Sul Lisboa e WtE Lipor Porto). As plantas de incineração de RSU com recuperação energética visitadas na Suíça e Portugal são de tecnologia avançada e pertencentes a 4ª geração. Como não há incinerador de RSU com recuperação energética em operação no Brasil, um projeto de base foi definido e estabelecidos os parâmetros operacionais e financeiro.

Para estimar os investimentos CAPEX (*CAPital EXpenditure*: despesas de capitais ou investimentos em bens de capitais) e OPEX (*OPerational EXpenditure*: despesas e dispêndios operacionais e no investimento em manutenção de equipamentos), foram avaliados os principais elementos do CAPEX e OPEX nas diferentes etapas (na construção de plantas e no processo de operação) das plantas

visitadas e com base em referenciais teóricos. Além disso, as receitas foram calculadas considerando os valores mínimos de atratividade do investimento.

3.4. Visitas Técnicas

Em setembro de 2017 foi realizado um conjunto de visitas técnicas a 4 incineradores de RSU com recuperação energética em operação na Suíça (SIG Geneva, Tridel Lausanne, Hagenholz Zurich, ERZO Oftringen). Em junho de 2018, foram realizadas visitas em 2 incineradores de RSU com recuperação energética em operação em Portugal (Valor Sul Lisboa e Lipor Porto). A quantidade gerada e tratada de RSU em 2015 nos dois países das plantas visitadas é apresentada na tabela 4 e as principais características dos quatro incineradores de RSU na Suíça e dois em Portugal seguem apresentadas na tabela 5.

Tabela 04: Geração, tratamento e disposição final de RSU em 2015 (milhares de toneladas por ano).

	Gerada	Compostagem	Reciclagem	Incineração	Aterro
Portugal	4.710	665	765	974	2.307
Suíça	6.030	1.256	1.924	2.850	0

Fonte: Eurostat (2016).

Tabela 05: Características dos incineradores nas visitas técnicas realizadas na Europa.

País	Suíça	Suíça	Suíça	Suíça	Portugal	Portugal
Nome local da Planta	SIG Les Cheneviers	Centre TRIDEL	KVA ERZO Oftringen	KVA Hagenholz	LIPOR	VALOSUL
Inicialização (nova linha ou atualização)	1993	2006	1992	2010	1999	2004
Cidade	Aire –La-Ville	Lausanne	Oftringen	Zürich-Hagenholz	Maia, Oporto	S. Joao de Talha
CEP	1288	1005	4665	8050	4471-907	2696-801
Endereço	Route de Verbois 40	Rue du Vallon 35	Alte Strasse 40	Hagenholzstrasse 110	Lugar de Cretins	Plataforma Ribeirinha da CP
Coordenadas (latitude e longitude)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Área de serviço principal ou nome do estado	Genève	Vaud	Aargau	Zürich	Oporto	Lisboa, Setubal
Capacidade total da planta (t/d)	696	468	192	720	1.280	2.000
Capacidade total da planta (t/ano)	240.000	180.000	64.000	240.000	441.600	662.000
Geração energia elétrica (MWh)	106.000	60.000	54.000	338.000	197.000	300.000
Geração térmica (MWh)	250.000	260.000	160.000	250.000	-	-
Norma de controle de emissões	Ordonnance sur la protection de l'air (OPair) (OFEV, 2018)				Diretiva 2010/75/EC (UE, 2010)	
Número de linhas	3	2	1	2	2	3
Poder Calorífico Nominal (MJ/kg)	13,1 (L1) 11,6 (L2,L3)	14,4	11,6	11,3 (L1) 11,7 (L2)	7,7	7,8
Forno (TIPO)	Grelha Móvel					
Modal de recebimento	Rodoviário + Fluvial	Rodoviário + Ferroviário	Rodoviário	Rodoviário	Rodoviário	Rodoviário
Website	https://ww2.sig-ge.ch	http://www.tridel.ch	http://www.erzo.ch	http://www.z-av.ch	http://www.lipor.pt	http://www.valorsul.pt
Proprietário da Planta	Service de l'environnement, SIG	TRIDEL AS	Entsorgung Region Oftringen	Entsorgung und Recycling Zürich ERZ	LIPOR	Valorsul, AS
Número de Habitantes	233.000	147.000	188.000	320.000	970.000	1.600.000

Continua na próxima página

Continuação da tabela 05

CAPEX / ANO do desembolso (em milhões de euro)	Não informado				\$ 100 (em 1995) sendo 50% do CAPEX oriundo do Banco Europeu e 50% dos Municípios	\$ 155 Euro (em 1999) sendo 40% da EU
Preço de venda da Energia Elétrica (Euro/MWh)	\$ 30	\$ 30	\$ 30	\$ 30	\$ 85	\$ 86
Gate fee (Euro/t)	\$ 100	\$ 190.34	\$ 100	\$ 100	\$ 20	\$ 23,782
Forno (FORNECEDOR)	Martin (linha 1) Von Roll (linha 2 e 3)	Von Roll Inova	Noell	W+E (linha 1) Martin (linha 2)	CNIM	Detroit Stoker
Caldeira (TIPO)	Vapor de água	Vapor de água	Vapor de água	Vapor de água	Vapor de água	Vapor de água
Caldeira (FORNECEDOR)	Wehrle (linha 1) ABB (linha 2 e 3)	Duro Dakovic	Wamser	Wehrle (linha 1) EVT (linha 2)	Martin	Foster Wheeler
Parâmetros do Vapor (°C/bar)	400/40	400/50	400/40	420/37	395/42	420/53
Sistema de tratamento de gases de combustão (TIPO)	Redução Não Catalítica Seletiva + Purificador úmido	Redução Não Catalítica Seletiva + Purificador úmido	Redução Não Catalítica Seletiva + Purificador úmido	WET SCR (linha 1) SD SCR (linha 2)	Redução Não Catalítica Seletiva+ Purificador semi-seco+Filtro de Tecido	Redução Não Catalítica Seletiva+ Purificador semi-seco+Filtro de Tecido
Tipo de Sistema de tratamento de gases de combustão ¹	RNCS+PU	RNCS+PU	RNCS+PU	RNCS+P U (L1) RNCS+P SS (L2)	RNCS+PSS+ FT	RNCS+PSS+ FT
Sistema de tratamento de gases de combustão (FORNECEDOR)	Lurgi / CTU	Von Roll Inova	LAB	Von Roll / ELEX (linha 1) Niro / ELEX (linha 2)	CNIM	EXXON/AIstrom

(1) Nota: L1 = Linha 1; L2 = Linha 2; L3 = Linha 3; RNCS = Redução Não Catalítica Seletiva; PU = Purificador úmido; PSS = Purificador semi-seco; FT = Filtro de Tecido, RO = Rodoviário; FL = Fluvial + FE = Ferroviário

- a) 46.194186, 6.032464
- b) 46.53373, 6.64522
- c) 47.303523, 7.922865
- d) 47.415326, 8.563371
- e) 41.228600, -8.650494
- f) 38.827924, -9.082443

Fonte: Próprio autor (visitas técnicas 2017 e 2018).

Além de a Suíça possuir normas de controle de emissões mais restritivas do que a União Europeia, existe também uma obrigação legal de incineração de todos os

RSU que não possam passar por processos de valorização por reciclagem, incluindo tratamentos biológicos da matéria orgânica e, por isso, não há direcionamento de RSU para aterros sanitários, ficando estes exclusivos para receber os rejeitos do tratamento (MANNARINO *et al.*, 2016).

As 8 etapas da Portaria nº 557 (BRASIL, 2016), conforme figura 8, foram percorridas sequencialmente, onde foram analisados os principais aspectos para melhor compreensão da incineração no sistema de gerenciamento de RSU e para reflexão sobre os fatores críticos para viabilidade financeira de um projeto de incinerador. Além disso, em cada etapa foram identificados e analisados os principais fatores críticos, e ações para os mesmos, para viabilidade dessa tecnologia no Brasil, assim como nos países em desenvolvimento. Ademais, foram propostos aspectos complementares à Portaria nº 557, acerca da etapa 8 de avaliação financeira-econômica com base no Guia de Análise de Custo-Benefício (CBA) de projetos de investimento da Comissão Europeia (EC, 2014).

3.4.1. Incinerador Zürich-Hagenholz - Suíça

No município de Zurique, na Suíça, existem dois incineradores de RSU com recuperação energética, um localizado em Josefstrasse e o principal localizado em Hagenholz. O incinerador de Hagenholz, mostrado na Figura 9, iniciou sua operação em 1969, foi remodelado em 1989 e 1993, e passou por última atualização em 2010, e tem capacidade de 240.000 toneladas por ano. A planta possui duas linhas com 8.200 horas por ano para cada linha. Aproximadamente 80% da demanda é oriunda dos municípios do consórcio e 20% do setor privado. O incinerador gera 338.000 MWh de energia elétrica e 250.000 MWh de energia térmica, sendo que 100% da energia térmica vai para sistema de calefação.



Figura 09: Foto da portaria do incinerador Hagenholz em Zurique (Suíça).
Fonte: Visita técnica do autor no incinerador de Zurique na Suíça (2017).

3.4.2. Incinerador KVA Oftringen ERZO - Suíça

O incinerador ERZO localizado na cidade de Oftringen, apresentado na figura 10, iniciou sua operação em 1992 e tem capacidade de 64.000 toneladas por ano. No início da década de 1990, o KVA foi adaptado às novas normas de proteção ambiental. Foi criada uma linha de fornos totalmente nova com recuperação de calor (geração de eletricidade), sistema de desnitrificação, lavagem de gases residuais em três etapas e tratamento de efluentes. A planta possui uma linha com rendimento de 8 a 10 toneladas por hora. Possui um gerador com capacidade bruta de 7,69 MW e controle de emissões de poeira com uso de precipitador eletrostático com capacidade de separação de 450 kg/h. Esta instalação atende a aproximadamente 180.000 habitantes. Opera com poder calorífico médio de 11.600 kJ/kg. Além disso a planta tem capacidade para incinerar lodo de esgoto em uma linha com forno rotativo.



Figura 10: Fachada do incinerador ERZO em Oftringen (Suíça).
Fonte: Visita técnica do autor no incinerador de Zurique na Suíça (2017).

3.4.3. Incinerador centre TRIDEL Lausanne - Suíça

O incinerador de RSU com recuperação energética de TRIDEL, iniciou sua operação em 2006, tem capacidade para 180.000 toneladas por ano. O alternador movido a turbina produz eletricidade para as próprias necessidades da TRIDEL (figura 11). A turbina da TRIDEL pode produzir energia elétrica para fornecer a eletricidade necessária a 23.000 pessoas. O vapor retirado da turbina é enviado aos trocadores que produzem água superaquecida a 175° C. Essa água superaquecida é então transportada para a usina de geração de calefação *Pierre de Plan* por um tubo isolado instalado na galeria técnica. A partir daí, é distribuído aos consumidores de calor, através de uma rede subterrânea de aproximadamente 113 km de extensão. Os edifícios conectados são assim abastecidos com aquecimento e água quente. A água que circulou na rede de calefação retorna à TRIDEL, com temperatura em torno de 80°C, para ser reaquecida nos trocadores de calor. A infraestrutura da planta conta ainda com o recebimento de resíduos pelo modal ferroviário, por túnel de 3,8 km que tem um custo de operação de \$ 35 EUR/ton.



Figura 11: Fotos do gerador do incinerador TRIDEL.

Fonte: Visita técnica do autor no incinerador de Zurique na Suíça (2017).

3.4.4. Incinerador SIG Les Cheneviers Genebra - Suíça

O incinerador de RSU com recuperação energética SIG de Genebra (Suíça) fica localizado em Cheneviers e processa quase 240.000 t/ano. A primeira planta de Cheneviers foi inaugurada em 1966. A planta atual data de 1993. Produz energia elétrica e térmica, operados pela CADIOM, empresa detida por 51% da SIG. A partir de 2023/2024 está prevista a operação da Cheneviers IV, uma planta mais eficiente.

Quase 40% dos RSU tratados de Genebra são transportados de barco, do centro da cidade, o que significa que o tráfego equivalente a 16.000 caminhões é evitado anualmente. Para compensar a falta de capacidade na vizinha França, os Cheneviers em 2019, incinerou cerca de 10.000 toneladas de resíduos da França. A entrada da planta de Genebra está mostrada na figura 12.



Figura 12: Foto da portaria de entrada dos caminhões no incinerador SIG (Suíça).
Fonte: Visita técnica do autor no incinerador de Zurique na Suíça (2017).

3.4.5. Incinerador Lipor Porto - Portugal

A Central de Valorização Energética Lipor, situada na Maia em Portugal, recebe o resíduo que não pode ser aproveitado por processos de compostagem e reciclagem, e através de um processo de queima controlada é produzido vapor de água que vai gerar eletricidade numa turbina. A LIPOR – Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto – gere, valoriza e trata os resíduos urbanos produzidos por oito municípios da área do Grande Porto (Espinho, Gondomar, Maia, Matosinhos, Porto, Póvoa de Varzim, Valongo e Vila do Conde), que representam um milhão de habitantes, cerca de 10% da população portuguesa. O incinerador Lipor mostrado na figura 13, dispõe de duas linhas de tratamento em operação contínua e praticamente automática, permitindo que a Central tenha uma capacidade de tratamento de 380.000 toneladas de resíduos por ano e produzindo cerca de 197.000 MWh de energia elétrica por ano, dos quais cerca de 90% são injetados na rede pública, o equivalente ao necessário para abastecer um aglomerado populacional da ordem de 150 mil habitantes. Neste processo, as cinzas produzidas ao longo do tratamento de gases são submetidas a um processo de inertização com ligantes hidráulicos, numa unidade dedicada, e têm como destino final a deposição em Aterro.



Figura 13: Foto do acesso ao incinerador Lipor (Portugal).
Fonte: Visita técnica do autor no incinerador Lipor em Portugal (2018).

3.4.6. Incinerador ValorSul Lisboa - Portugal

O incinerador de RSU Valorsul está localizado na área metropolitana de Lisboa é uma empresa multimunicipal de gestão de resíduos, integrada pelos municípios de Lisboa, Loures, Amadora, Vila Franca de Xira e Odivelas, e ainda pela Empresa Geral do Fomento, S.A e pela associação “AMO MAIS”. A Valorsul é responsável pela gestão dos resíduos urbanos produzidos por 19 Municípios da Grande Lisboa e da Região do Oeste. A incineração dos RSU com valorização energética ocorre na Central de Tratamento (CT) de RSU em São João da Talha vista na figura 14, com uma capacidade de 662.000 toneladas por ano, nos quais se incluem principalmente os resíduos urbanos e equiparados, mas também resíduos gerados na Estação de Tratamento de Valorização Orgânica (ETVA) da Valorsul. A central tem três fornos e, por hora, são incineradas cerca de 28 toneladas de resíduos em cada forno. A Valorsul vende energia para a Rede Elétrica Nacional e esta é a principal fonte de receita da empresa. Essa energia é produzida na sua maioria pela Central de Valorização Energética, mas também nos dois aterros sanitários e na Estação de Tratamento e Valorização Orgânica. A eletricidade exportada é suficiente para alimentar uma cidade com 150 mil habitantes.



Figura 14: Foto da vista aérea do incinerador Valorsul (Portugal).
Fonte: Imagem aérea do incinerador Valorsul em Portugal (2018).

4. RESULTADOS:

Os resultados estão apresentados em ordem sequencial considerando as oito etapas estabelecidas na Portaria nº 557 mostradas na figura 8. Nas seções 4.1 a 4.8 são detalhados os resultados gerais, para cada uma das oito etapas do modelo de estudo de viabilidade técnico econômica de uma planta de tratamento térmico com recuperação energética de RSU, considerando as peculiaridades dos países em desenvolvimento, com especial destaque ao município do Rio de Janeiro no Brasil. Destarte, discorreu-se sobre os desafios existentes em cada etapa e apresentados os resultados da simulação aplicada à cidade do Rio de Janeiro da avaliação técnico-econômica da planta de incineração de RSU. Por último, são sumarizados e apresentados os desafios para adoção dessa tecnologia nos países em desenvolvimento e proposto um conjunto de ações para abordar esses desafios.

4.1. Estudo de regionalização

O estudo de regionalização é utilizado para definir a escala adequada para a prestação de serviços e avaliar o dimensionamento apropriado para o tratamento dos RSU, considerando a escala econômica apropriada e a possibilidade de consorciamento (BRASIL, 2016). As propostas avaliadas para o estudo da regionalização devem estar alinhadas com os conceitos e diretrizes estabelecidos na Lei Nacional de Saneamento Básico (LNSB).

As principais características técnicas do projeto de instalação da planta devem ser avaliadas para uma melhor compreensão dos impactos econômicos, sociais e ambientais locais do projeto (EC, 2014) tais como:

- a) Dados básicos sobre os resíduos a serem tratados: tipos de resíduos e quantidade anual (t/ano);
- b) Processo de tratamento com descrição das tecnologias utilizadas e parâmetros de projeto (capacidade média e máxima em t/d e t/h);
- c) Consumo específico de energia, materiais e serviços consumidos;
- d) Balanço de massa do processo de tratamento com principais entradas e saídas, incluindo matérias-primas secundárias recuperadas, energia produzida (MWh de calor e / ou energia) e perdas de massa;
- e) Características físicas: área ocupada pela planta (em mil m²) e análise da localização da planta; e
- f) Informações sobre estratégia de compras, disponibilidade de fornecedores e cronograma de construção.

Os estudos de regionalização devem incluir, entre outros, os seguintes aspectos (BRASIL, 2016):

- a) A otimização do âmbito territorial (otimização logística) para a prestação de serviços e possibilidades de consórcio, levando em conta as diretrizes da área de influência (podendo ser um conjunto de municípios ou uma parcela de um deles);
- b) A avaliação da escala econômica adequada à execução dos serviços, bem como seu menor impacto sobre o meio ambiente e a saúde humana frente a legislação local e nacional incluindo os aspectos políticos; e
- c) A delimitação espacial de abrangência dos serviços (geração de RSU da região e área de influência) em vista da institucionalização de aspectos específicos, em particular a existência de uma região metropolitana. Para tanto, é necessário identificar a origem, volume e caracterização dos resíduos gerados no município/região estabelecidos.

A análise da localização é um dos fatores críticos para um projeto de incinerador, pois busca a proximidade do centro de massa de geração de RSU da cidade (ou consórcio) e também deve levar em conta diversos outros fatores como: a

proximidade relativa de um aterro que possa receber a escória; a proximidade de polos industriais que possam consumir a energia térmica produzida, reduzindo as distâncias de distribuição e maximizando a comercialização da mesma; a proximidade de uma subestação de energia elétrica para reduzir a perda por dissipação da energia decorrente da sua transmissão; a proximidade de estação de transferência de RSU para otimização do custo logístico; e a disponibilidade e custo da área (terreno) para construção (GIZ, 2017).

Algumas plantas operam com outros modais além do rodoviário, como o caso dos incineradores na Suíça, o SIG (fluvial) e Tridel (ferroviário), conforme apresentado na tabela 5. É comum encontrar regulamentos muito rígidos para localizar uma instalação de gerenciamento de RSU em uma cidade muito densa, caso a circulação normal do tráfego seja afetada, mesmo assim, na UE diversas plantas estão localizadas no centro de cidades desenvolvidas como Paris, Viena, Copenhague, etc. (COELHO, 2020). Na China, a maioria das plantas estão localizadas nos centros urbanos mais desenvolvidos economicamente (ZENG *et al.*, 2013).

Segundo Gandolla (2013), existem duas tendências bem distintas na escolha da localização de uma implantação de um incinerador de RSU. A primeira é a proximidade com as fontes geradoras de RSU para mitigar os custos com logística. Já a segunda tendência procura ater-se o máximo possível à avaliação de impacto ambiental. Nesse caso, com objetivo de limitar a poluição causada pelo trânsito de veículos de coleta de resíduos e outros meios de transporte privados, se decidirá muito provavelmente por construir a planta de eliminação de resíduos nas proximidades dos centros urbanos

Os fatores ambientais e arquitetônicos serão de importância fundamental, não somente para a inserção ambiental das instalações, mas também porque é necessário respeitar as restrições de emissão, de barulho e de eliminação de odores (GANDOLLA, 2013). Normalmente, as plantas de incineração com recuperação energética de RSU são construídas dentro ou perto de áreas industriais para reduzir as distâncias de distribuição de calor (GANDOLLA, 2013). Na Europa, algumas plantas de incineração de RSU com recuperação energética também estão próximas a áreas residenciais em função da eficiência logística. A área ocupada é categorizada como área industrial construída.

As instalações de incineração com recuperação energética em localizações centrais nas cidades podem ser indesejáveis do ponto de vista estético (GIZ, 2017).

No entanto, modernas instalações de incineração de RSU com recuperação energética operando nos EUA, Europa, Japão e outras nações foram projetadas com essa preocupação. As plantas de incineração com recuperação energética localizadas nos centros de cidades arquitetonicamente sensíveis, mostraram que os projetos podem ser compatíveis com as exigências estéticas locais. Em Paris há uma planta de incineração com recuperação energética (Isseane ENNOVIA) no Sena, a cinco quilômetros da Torre Eiffel. Algumas cidades, como Viena, Paris, Osaka e Brescia construíram plantas de incineração com recuperação energética que se tornaram marcos e atrações turísticas. Isto está em contraste com os aterros que geralmente estão localizados em áreas distantes das regiões habitadas. As plantas de incineração com recuperação energética são construídas no meio de locais residenciais ou industriais para facilitar o uso do vapor de baixa pressão subproduto do gerador de turbina para aquecimento ou resfriamento urbano ou industrial. Um exemplo dessa prática é a Dinamarca, onde uma população de 5,5 milhões é servida por 28 plantas de incineração com recuperação energética, a maioria delas em áreas urbanas (CEWEP, 2017).

Para estabelecer a localização da instalação da planta de incineração com recuperação energética no município do Rio de Janeiro, os seguintes aspectos devem ser considerados conforme apresentados no quadro 1:

Categoria de análise	Critério	Justificativa
Social	Disponibilidade operacional da mão de obra	A disponibilidade e / ou proximidade de mão de obra qualificada para fase de construção e, em especial, operação da unidade.
Econômico	Custo do terreno	Disponibilidade e custo médio da área disponível para construção da planta de incineração.
Econômico	Proximidade da fonte geradora	Proximidade dos centros com maior concentração populacional e maior taxa de geração de resíduos per capita.
Econômico	Demais resíduos da região	A existência de outros resíduos com poder calorífico na região deve ser estudada, pois pode representar uma melhoria na eficiência global do sistema de tratamento térmico.
Social Político	Fator pioneiro	O efeito de demonstração (existência de um projeto modelo que serve como agente promotor) pode ser um critério político para mitigar entraves sociais e políticos.
Político	Expropriação	A existência de áreas viáveis para desapropriação deve ser considerada.
Político	Zoneamento municipal e urbano	Deve-se notar as restrições de uso e ocupação das regiões, de acordo com o zoneamento municipal e urbano. Se existir, o Plano Diretor Municipal deve ser considerado
Econômico	Custo de transporte	O custo de transporte dos veículos de coleta (km/t) deve ser calculado. Um raio econômico de no máximo 100 km deve ser considerado para o transporte de resíduos urbanos.
Social Político	Histórico da área impactada	Áreas já degradadas ambientalmente podem ser atraentes para usar a planta de incineração como um projeto de recuperação de área. (por exemplo, na Espanha, a usina de tratamento térmico aproveitou a área de mineração já prejudicada do ponto de vista ambiental).
Físico	Recurso água	A disponibilidade de água de processo em quantidade e qualidade adequadas para estações de tratamento térmico.
Físico	Linhas de transmissão	A existência de linhas de transmissão de energia elétrica para comercialização da energia elétrica.
Físico	Tipo de relevo	O tipo de relevo existente no local deve ser compatível com o projeto da planta, implicando um trabalho mínimo de aterramento.

Continua na próxima página

Continuação do quadro 01

Físico	Parâmetros meteorológicos	Apesar da pequena variação dentro de um município, a variabilidade sazonal de alguns parâmetros deve ser levada em consideração, como umidade, precipitação e temperatura.
Logística	Proximidade do aterro	Deve-se notar a disponibilidade de áreas para disposição final dos rejeitos do incinerador.
Logística	Proximidade com polos industriais	A proximidade de polos industriais que podem consumir a energia térmica e/ou elétrica produzida pelo incinerador.
Logística	Proximidade da subestação de energia elétrica	A proximidade de uma subestação de energia elétrica para que a energia gerada não se dissipe completamente no caminho.
Logística	Proximidade de estações de transbordo	A existência e proximidade de estações de transbordo dentro do raio de 100 km, pois reduz os custos iniciais de investimento além dos custos de R\$ por t/km de veículo de transbordo e veículo de coleta.
Biótica	Existência biótica de Unidades de Conservação (UC's)	Deve-se notar a existência de Unidades de Conservação Estaduais e Federais nas proximidades do local, bem como suas restrições de uso em zonas.
Biótica	Área de Preservação Permanente	A ocupação deve ser respeitada junto à Área de Preservação Permanente - PPA
Biótica	Espécie Biológica Endêmica Locais	Existência de espécies endêmicas de fauna e/ou flora devem ser verificadas e evitadas ou medidas de conservação efetivas devem ser tomadas.
Biótica	Ambientes de relevância ambiental	Os ambientes em que são diagnosticados fatores ambientais específicos de relevância para a conservação ou de aspectos ambientais únicos devem ser desconsiderados, pois sua preservação é uma prioridade.

Quadro 01: Principais critérios metodológicos para tomada de decisão em relação à localização do incinerador.

Fonte: Adaptado GIZ (2017).

Além dessas variáveis, aspectos de acesso (fluxo rodoviário e trânsito local) podem ser considerados, uma vez que as plantas de incineração de resíduos geram tráfego intenso (GANDOLLA, 2013). Para estabelecer a localização geográfica, é recomendado um modelo matemático de otimização logística usando software de programação linear.

Na presente simulação, em função da impossibilidade de se realizar um estudo de localização mais detalhado optou-se, após uma análise qualitativa, por desenvolver o estudo utilizando como referência o bairro do Caju (coordenadas geográficas: 22° 52'47"S 43°13'19"W) por se tratar de uma área onde já existem instalações de gestão de RSU, estar próxima ao centro de massa de geração de RSU, possuir acesso adequado por estar nas proximidades de uma estação de transferência de resíduos, que recebe cerca de 3.000 t/d de resíduos provenientes da coleta municipal. O RSU é transportado da estação de transferência do Caju por carretas para o aterro (a cerca de 50 km). Portanto, para o presente modelo preliminar, foi considerada uma planta localizada no Caju com capacidade de 900 t/d (270.000 t/ano), o que equivale a aproximadamente 10% do total coletado na cidade do Rio de Janeiro. Oliveira (2020) em estudo de localização de incineradores de RSU na região metropolitana do Rio de Janeiro, concluiu que, entre as 6 áreas consideradas viáveis, a região do Caju estava incluída.

Na questão da localização, outro fator crítico está relacionado ao efeito *Not in My Backyard* (NIMBY), muito conhecido como a rejeição de parte da comunidade envolvida no entorno de uma unidade de gerenciamento de resíduos com base em argumentos como distúrbios causados pelo aumento do transporte, os distúrbios criados durante o dia, principalmente a noite, os odores, e o mais importante, a percepção de que a saúde estará em risco (COELHO, 2020). Seleções inadequadas de locais para plantas de incineração de RSU são a principal razão para os sentimentos de NIMBY na China (ZHANG *et al.*, 2015). Mesmo ainda não tendo incineradores de RSU com recuperação energética em operação no Brasil, este efeito já é notado em algumas mídias e posicionamentos políticos em alguns municípios e estados.

Os RSU coletados no Rio de Janeiro, em 2016, atingiram uma média de 9.227 toneladas por dia (COMLURB, 2017). A população estimada para a cidade do Rio de Janeiro em 2016 era de 6.498.837 habitantes (IBGE, 2017). De acordo com o Programa Ambiental das Nações Unidas (2018), há uma tendência crescente de geração por habitante de resíduos domésticos, de pelo menos 25%, na próxima década na América do Sul até 2050 (UN ENVIRONMENT, 2018). Assim, é possível esperar que o valor atual de 1,62 kg/hab/d de geração de resíduos na cidade do Rio de Janeiro (RIO DE JANEIRO, 2015; FEITOSA *et al.* 2018) possa seguir o mesmo padrão. O Rio de Janeiro usa o aterro sanitário como a principal estratégia de

gerenciamento de RSU, onde quase 100% dos resíduos coletados são descartados (COMLURB, 2017). A composição dos resíduos no Rio de Janeiro é mostrada na tabela 6.

Tabela 06: Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do Rio de Janeiro em 2017.

Composição	(%)
Não reciclável	56,9
Orgânico	52,0
Folhas	1,0
Madeiras	0,4
Panos	3,1
Couros	0,4
Recicláveis	42,0
Papel e papelão	15,6
Plásticos	21,0
Vidro	3,5
Borrachas	0,2
Metais	1,7
Inertes	1,1

Fonte: COMLURB (2017).

Com base na análise gravimétrica da tabela 6 e utilizando valores caloríficos estimados para cada fração do resíduo (madeira 50% de umidade 8–9 MJ/kg; papel / papelão 14-15 MJ/kg; plástico 28-35 MJ/kg; metal, vidro, concreto 0 MJ/kg; resíduos orgânicos 4 MJ/kg) (THEMELIS *et al.*, 2013), o Poder Calorífico Inferior (PCI) dos RSU coletados no Rio de Janeiro é estimado em 9.832 kJ/kg. Para garantir o processo de combustão eficiente, o PCI não deve ficar abaixo de 7.000 kJ/kg, em média, durante um ano (WORLD BANK, 1999b; GIZ, 2017). Considerando um índice de umidade típico de 40%, este valor de 9.832 kJ/kg é superior ao valor mínimo de referência teórica e permite a queima sem a necessidade de adição de combustível auxiliar.

Segundo o World Bank (2000), os resíduos sugeridos para incineração sem combustível auxiliar devem ter um teor de água inferior a 50%, um teor de cinzas inferior a 60% e uma combustibilidade superior a 25%. O alto teor de umidade e sua tendência de gerar HCl e SO₂ e outros gases ácidos após a oxidação podem corroer as instalações do incinerador (ZHANG *et al.*, 2015).

A tabela 7 mostra os valores de Poder Calorífico Inferior (PCI) dos RSU de entrada em diversos incineradores na Europa e nos Estados Unidos e suas respectivas capacidades sendo.

Tabela 07: Poder calorífico inferior e capacidade dos incineradores na Europa e nos EUA.

Unidade WtE	Capacidade (t/ano)	PCI (kJ/kg)
Principado Andorra	60.000	9.380
Dinamarca	380.000	8.414
França 1	18.700	8.426
França 2	37.500	8.405
França 3	75.000	8.405
Irlanda	200.000	8.443
Italia	300.000	8.405
UK 1	50.000	8.443
UK 2	100.000	8.443
UK 3	200.000	9.003
EUA	300.000	11.715
Suíça SIG ¹	231.799	12.350 ²
Suíça TRIDEL ¹	156.000	14400
Suíça Oftringen ¹	64.000	11.600
Suíça Hagenholz ¹	240.000	11.500 ²
Portugal Valorsul ¹	441.600	7.700
Portugal Lipor ¹	662.000	7.600

(1) Dados obtidos nas visitas técnicas

(2) Média linha 1 e linha 2

Fonte: Eurostat (2016) e próprio autor (visitas técnicas 2017 e 2018).

4.2. Estudo de demanda

Nesta etapa é identificada a expectativa de demanda pelos serviços, referenciando-se em estudos populacionais e em previsão de tempo do contrato a ser celebrado e em horizonte de 30 anos, discriminando dados físicos (volumes, massa de resíduos coletados, habitantes atendidos, dentre outros), incluindo também os parâmetros de projeção e as análises de sensibilidade dos mesmos (BRASIL, 2016). No caso do incinerador, além da demanda por tratamento de RSU, deve-se considerar a demanda por energia elétrica e/ou térmica.

Segundo o CEWEP (2017), a recuperação total de energia de um incinerador moderno é de 50 a 70% do conteúdo energético dos RSU, dos quais 15 a 25% são energia elétrica e o restante é energia térmica, com essa proporção podendo variar de acordo com as necessidades locais (ISWA, 2012; BNDES, 2014). Países que não tenham utilização da energia térmica para calefação, dependerão de proximidade aos polos industriais que possam vir a consumir a energia térmica (ou até mesmo o vapor).

Caso contrário, o indicado é conversão para energia elétrica como é o caso dos incineradores visitados em Portugal, conforme tabela 5.

Autores indicam valores médios da ordem de 400 a 700 kWh/t, de geração de eletricidade por tonelada de RSU encontrados nas atuais plantas (TOLMASQUIM, 2003; PSOMOPOULOS *et al.*, 2009; EPE, 2011; MARTIN *et al.*, 2017). De acordo com Yan *et al.* (2020), a faixa típica de geração elétrica é de cerca de 500 a 600 kWh/t (de RSU usados como combustível) nos países desenvolvidos e 300 a 400 kWh/t nos países em desenvolvimento, face as diferenças do valor calorífico dos RSU entre esses países.

Segundo a Companhia de Eletricidade do Rio de Janeiro (Light Serviços de Eletricidade SA), em 2015, o consumo anual total de eletricidade (incluindo residencial, industrial, comercial, rural, energia pública, iluminação pública, serviço público) do Estado do Rio de Janeiro foi de 2.016 MW (LIGHT, 2017). Uma parcela pequena deste consumo poderia ser suprida pelo incinerador.

Existe uma preocupação pública relacionada ao possível impacto da incineração nos postos de trabalho existentes pois, em muitos municípios brasileiros, existem um número significativo de trabalhadores informais (catadores) responsáveis pela separação dos materiais dos RSU para reciclagem (COELHO, 2020). Portanto, há uma preocupação de que a utilização de incineradores inviabilize a atividade dos catadores que perderiam seus postos de trabalho embora o padrão de reciclagem de resíduos secos seja da ordem de apenas 6%, sendo a maioria dos materiais recicláveis destinados a aterros sanitários (SNIS, 2018).

Segundo Contrera *et al.* (2018), considerando apenas as coletas realizadas pelas prefeituras, mais de 60 % dos municípios do estado do Rio de Janeiro não encaminham o RSU para a reciclagem, com exceção de dois municípios do estado que já encaminharam mais de 20 % do seu RSU para a reciclagem, como por exemplo o município de São José de Ubá.

Apesar de não correlacionados, os dados da UE mostram que os países que apresentam as maiores taxas de reciclagem são os que têm parte significativa dos seus resíduos incinerados com valorização energética, enquanto os países que não possuem instalações de incineração apresentam as menores taxas de reciclagem (PSOMOPOULOS *et al.*, 2009; THEMELIS *et al.*, 2019). Com taxas de reciclagem muito superiores aos países em desenvolvimento, os países dos incineradores

visitados, Suíça e Portugal, apresentam taxas de reciclagem de 47,3% e 20,7% respectivamente conforme apresentado na tabela 5.

A concepção de conflito entre reciclagem e uso de energia dos RSU, pode ser listada entre os fatores críticos para não uso da incineração de RSU em vários países (CUCCHIELLA *et al.*, 2012; GIZ, 2017). Mesmo com a reciclagem intensiva, sempre sobra RSU sem valor material ou de mercado e, até em alguns casos, classificados como perigosos. Esse rejeito com certo poder calorífico pode ser aproveitado para recuperar energia e substituir uma parcela do uso de combustíveis fósseis (GIZ, 2017).

4.3. Estudo do valor do investimento

O CAPEX (*CAPital EXpenditure*) dos incineradores são as despesas de capital ou investimentos e referem-se ao somatório dos custos relacionados ao planejamento e construção do projeto ($CAPEX = C = \sum_{i=1}^n Ci$). O CAPEX dos equipamentos é influenciado pelo tipo de energia que se pretende recuperar (MAISIRI *et al.*, 2015). Com base nos valores médios obtidos nas visitas técnicas, do CAPEX total, os equipamentos de processamento térmico (incinerador/caldeira) (C_1) representam aproximadamente 35%, os equipamentos de produção de energia (turbinas e geradores) (C_2) representam 10%, o sistema de tratamento de gases de combustão (C_3) representam 25%, as obras civis (C_4) representam 20% e os demais elementos (aquisição do terreno, licenciamento (Licença Prévia (LP), Licença de Instalação (LI) e Licença de Operação (LO)), documentação, sobressalentes, demais equipamentos para processamento de cinzas, transmissão elétrica, etc.) (C_5) representam 10%. Também devem ser quantificados, os custos das medidas mitigadoras e compensatórias de caráter social e ambiental, que opcionalmente, ao invés de fazer parte dos investimentos, podem estar incluídos nos custos e despesas (BRASIL, 2016).

O CAPEX pode ser dividido em percentuais de componentes aproximados, conforme detalhado na tabela 8.

Tabela 08: Principais componentes de CAPEX de uma planta convencional de incineração de RSU com recuperação energética.

CAPEX	Refere-se a	% do CAPEX	Elementos de CAPEX incluídos
Aquisição de terreno e outros	A. Projeto e outras despesas	10% do CAPEX	Despesas com autoridades administrativas (diversas), custo de licenciamento ambiental, custo do terreno (aquisição), custos de contratação de empresa de engenharia e arquitetura, custos com testes, cobertura de seguros para danos em operação na fase de projeto e construção (quebra de maquinário, danos na interrupção de operação causados por falhas de máquinas, riscos de computador), equipamentos de logística interna, gastos com mão de obra própria e terceirizada, computadores e softwares entre equipamentos auxiliares.
Prédio (obras civis) e Diversos (aprovações, obras gerais, transmissão elétrica e interconexão etc.)	B. Construção civil C. Área de recebimento dos resíduos D. Área de descarga e armazenamento de resíduos a serem incinerados	20% do CAPEX	Custo de pavimentação, custo de construção do edifício administrativo, custo de construção da zona aberta de purificação de fumaça e tratamento de desperdício, custo de construção da infraestrutura industrial. Investimentos e custos com a infraestrutura da portaria, balanças para caminhões e pátios de caminhões. Áreas de carregamento, área de caracterização de RSU, área de armazenamento de RSU, pátio de resíduos ferrosos, pátio de resíduos não-ferrosos, sucata para resíduos a granel, guindaste móvel (principal e reserva) e poço de recebimento de resíduos sólidos urbanos.
Equipamentos de processamento térmico (incinerador / caldeira)	E. Forno de incineração e equipamento auxiliar	35% do CAPEX	Tremonha de carga, alimentador, câmara de combustão, grelha de combustão, refratários, central hidráulica de alimentação, extrator de escória, queimadores auxiliares, sistema de evacuação de cinzas sob a grelha, sistema de evacuação de cinzas volantes, circuito de ar de combustão primária, circuito de ar secundário de combustão e cinzas e escórias, correia transportadora.

Continua na próxima página

Continuação da tabela 8

Equipamentos de produção de energia (turbinas e geradores)	F. Caldeira e equipamento térmico para recuperação de energia	10% do CAPEX	Reservatório de água, bombas de alimentação da caldeira, recuperação da caldeira, economizador, sistema de ebulição, aquecedor, válvula reguladora de pressão de vapor, condensador de ar, reservatório de material condensado, bomba de extração de condensado, turbo alternadores, trocador de calor do sistema, circuito de ar quente e aquecedor de ar primário.
Sistema APC (tratamento de gases de combustão)	G. Seção de liberação de fumaça e descarga	25% do CAPEX	Compartimento de encaminhamento de fumaça da caldeira, filtro de poeira, equipamentos de resfriamento, torre de lavagem, ventilador, chaminé, sistema de injeção de água, injeção e sistema de armazenamento de soda cáustica, sistema de drenagem de água no primeiro estágio, sistema de remoção de água do processo de lavagem, neutralizador, tanque de decantação leito (roteamento de água tratada), prensa filtro, compartimento receptor para resíduos tóxicos, tanque de decantação, leito granular, caldeira de lodo (tanque decantador), prensa filtro, compartimento receptor de resíduos tóxicos, manganês e filtros adsorventes de carbono pó de silício.
	H. Tratamento de cinzas volantes e poeira		Sílica de cinzas volantes da caldeira e do filtro, reator de separação, prensa de filtro, sistema de tratamento de água de lavagem e prensa / secador de filtro.
	I. Tratamento de resíduos sólidos extraídos da água de lavagem de gases		Silo de lodo, sistema de adição de cimento, sistema de adição de reagentes (vários) e área de expedição dos cubos de concreto.
	J. Equipamento eletrônico e instrumentos para comando e ajuste		Gerador a diesel, turbogerador (casa de força), casa de bombas de água, transformadores de elevação, salas com painéis e instrumentos elétricos de automação.

Fonte: Visitas técnicas em 6 plantas de incineração com recuperação energética em operação na Europa em 2017 e 2018 (próprio autor) e Griffiths e Willians (2005).

As melhores tecnologias disponíveis podem ser encontradas nas recomendações previstas na BAT (BAT⁴ - *Best Available Techniques*) que incluem padrões sobre o uso da tecnologia e de que forma a instalação deve ser projetada, construída, mantida, operada e desativada, com controle dos padrões de emissões atmosféricas, efluentes e resíduos do processo.

A combustão em fornos de grelha, utilizada nos seis incineradores visitados conforme tabela 5, é uma tecnologia comercialmente comprovada em uso há mais de 130 anos e a tecnologia mais utilizada mundialmente em relação a outras tecnologias de processamento térmico de RSU (STANTEC, 2011; IEA, 2013; LOMBARDI *et al.*, 2015; CHALIKI *et al.*, 2016; MARTIN *et al.*, 2017)

O CAPEX dos incineradores na Europa está em torno de 710 a 1.065 US\$/t da capacidade anual da planta (CEWEP, 2011; ISWA, 2012; O'BRIEN, 2013; THEMELIS *et al.*, 2013). Os valores de CAPEX dos incineradores de Portugal são de US\$ 435 / t (Lipor) e US\$ 423 / t (Valorsul) (ABRANTES, 2016), quase 50% menores do que a média da UE. Isto se explica em função de uma política de estado da UE com investimentos a fundo perdido, para os países membros menos desenvolvidos, para os setores de infraestrutura e serviços (inclusive na gestão de RSU), com objetivo de reduzir as desigualdades na região como um todo. Existem diferenças significativas entre os valores relatados na literatura para o CAPEX de instalações de incineração na China e na Europa. Em 25 plantas europeias, o CAPEX médio é de US\$ 880 / tonelada, enquanto na China o CAPEX médio é de US\$ 228 / tonelada conforme figura 15. Na China, o investimento médio (em milhões de dólares) duplicou de 2010 a 2020, e a maior parte do aumento de custos de capital se deve aos requisitos crescentes dos padrões de emissão e melhor qualidade de construção (YAN *et al.*, 2020). Apesar desse aumento, o investimento médio da China é significativamente inferior à referência da UE.

⁴ Documento de referência sobre as melhores técnicas disponíveis para a incineração de resíduos que apresenta os resultados de um intercâmbio de informações entre os Estados-Membros da UE, as indústrias, as organizações não governamentais que promovem a proteção do ambiente e a Comissão, para elaborar, rever e, se necessário, atualizar os documentos de referência, conforme exigido pelo artigo 13(1), da Diretiva 2010/75/EC, relativa às emissões industriais. Fonte: Comissão Europeia termos do artigo 13(6), 2010.

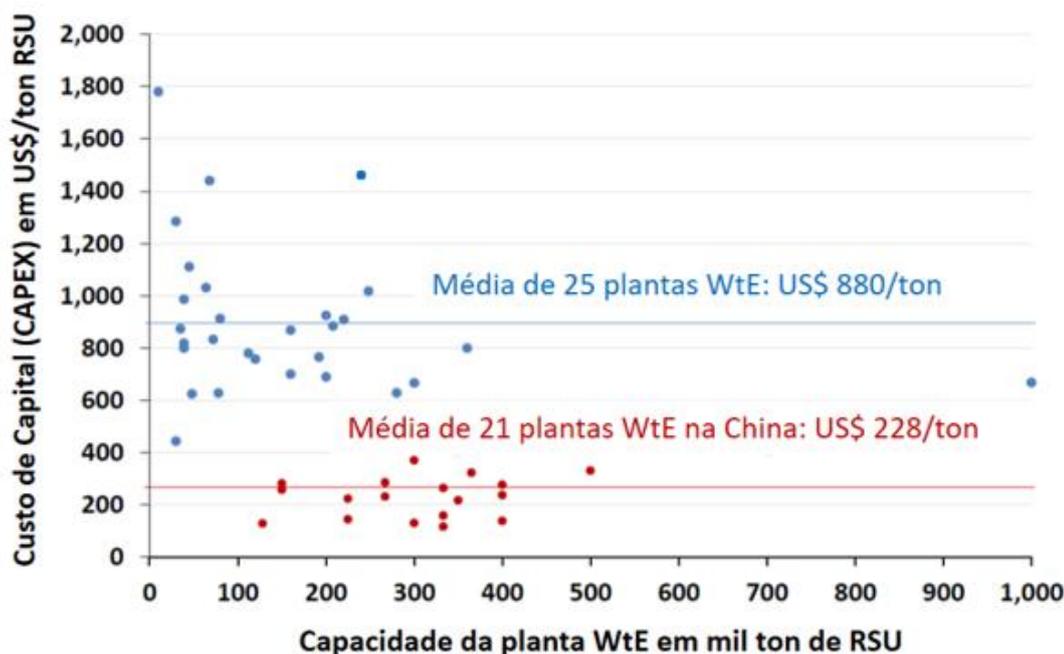


Figura 15: Custo de Capital versus Capacidade da planta de incineração com recuperação energética.

Fonte: Themelis *et al.* (2013) e China Research and Intelligence (2014).

Os elevados valores iniciais de CAPEX constituem um fator crítico para a implementação de incineradores de RSU nos países em desenvolvimento. Devido a isso, existem tentativas de se trazer, de países em desenvolvimento, projetos de menor custo com padrões de controle de emissões inferiores aos mais modernos. (UN ENVIRONMENT, 2018; COELHO, 2020; YAN *et al.*, 2020).

O controle e tratamento de cinzas volantes e dos gases é um dos maiores desafios em termos de esforços para desenvolver uma rede sustentável de incineradores (YAN *et al.*, 2020). Os projetos de baixo CAPEX podem, por exemplo, não empregar sistemas adequados de tratamento de gases de combustão, utilizar aço e refratários de baixa qualidade nos componentes da planta (ex.: forno), além de aumentarem o risco de quebras não planejadas, ou aumento da corrosão de componentes críticos, levando, com isso, a uma vida útil operacional mais curta da planta (GIZ, 2017). Em consequência, pode haver um aumento dos custos de operação e manutenção, além de uma possível redução da taxa de utilização da operação da planta, impactando o fluxo de entrada das receitas.

A redução da taxa de juros de financiamento a ser obtida é um fator crítico para viabilização financeira do projeto do incinerador. Na UE, o Banco Europeu tem participação inicial no investimento em torno de 50%, como no incinerador Lipor, e

com baixas taxa de juros, como no incinerador Valorsul, que foram na faixa de 1,16 a 3,17% ao ano. Os custos e investimentos ao longo do tempo no fluxo de caixa trazidos a valor presente são diretamente influenciados pela taxa de juros bancária adquirida para o financiamento. Portanto, a viabilidade econômica de um projeto de grande aporte de capital como o incinerador depende diretamente do nível de taxa de juros obtida para o projeto.

O CAPEX é fortemente influenciado pelo custo dos equipamentos, que é relacionado ao tipo de energia recuperada (MAISIRI *et al.*, 2015) e os gastos de construção civil. As premissas de CAPEX para a planta de incineração com recuperação energética incluem também a área da terra necessária para instalação da planta. Há uma grande quantidade de infraestrutura que deve ser construída em torno da instalação. Isso incluirá escritórios de administração, estradas e o espaço necessário para o armazenamento de uma quantidade suficiente de resíduos.

O custo do terreno também é um elemento do CAPEX, e a área necessária, para uma capacidade de 270.000 toneladas com duas linhas de operação para o Rio de Janeiro, foi estimada em 100.000 m² levando em consideração a possibilidade de futura expansão. A tabela 9 mostra os requisitos de terreno aproximados de várias configurações de plantas de incineração de RSU com recuperação energética. Mesmo a planta sendo de 270.000 toneladas, a área de aquisição do terreno estimada foi de 82.800 m² por considerar uma área adicional que possa vir a ser utilizada para futuras expansões.

Tabela 09: Requisitos de área de terra.

Capacidade (t/ano)	160.000 (1 linha)	336.000 (2 linhas)	640.000 (2 linhas)	960.000 (3 linhas)
Comprimento da planta (m)	150	240	360	360
Largura da planta (m)	70	100	130	150
Área total da planta (m ²)	10.500	24.000	46.800	54.000
Comprimento do terreno (m)	250	360	460	460
Largura do terreno (m)	170	230	230	250
Área total do terreno (m ²)	42.500	82.800	105.800	115.000
Terreno ocupado pela planta (%)	25	29	44	47

Fonte: Themelis *et al.* (2013)

A área utilizada para incineradores para uma mesma quantidade de resíduos é significativamente menor do que a necessária em aterros sanitários. O custo de investimento no terreno de incineradores é fixo (a menos que ocorra uma expansão)

enquando que no caso dos aterros os investimentos no preparo das áreas de aterramento são contínuos (CHALIKI *et al.*, 2016).

O CAPEX da planta com capacidade de 270.000 toneladas por ano no Rio de Janeiro foi estimado em US\$ 243 milhões. Este valor de investimento representa um custo médio de capital (CAPEX) de US\$ 900/t, semelhante à média de 25 plantas de incineração com recuperação energética em operação na Europa (US\$ 880/t), como mostrado na figura 15.

Um plano de implementação típico para uma planta de incineração com recuperação energética está em torno de cinco anos até o início da operação, incluindo cerca de 24 meses para a fase de viabilidade de projeto (estudo de pré-viabilidade, decisão política, estudo de viabilidade e licenciamento ambiental), 12 meses para a fase de preparação do projeto (estabelecimento de uma organização/empresa, processo de licitação e engenharia financeira, preparação de documentos da licitação) e 24 meses para a fase de implementação do projeto (contratos, negociações, construção e supervisão, comissionamento) (RAND *et al.*, 2000). Estes tempos foram considerados na DRE⁵ (Demonstração do Resultado do Exercício) do projeto da planta de incineração com recuperação energética conforme detalhado na secção 4.8.3. O fluxo de caixa dos investimentos (CAPEX) são concentrados nos anos pré-operação da planta e são lançados em uma DRE juntamente com os custos (fixos e variáveis), as despesas e as receitas para o horizonte de 30 anos. Um estudo de pré-viabilidade deve ter um grau de "imprecisão" de até 20% como base do orçamento de investimento (UNIDO, 2019). Portanto, dado que o CAPEX depende de diversos fatores (como os índices mundiais de preços do aço, a valorização da moeda local, etc.), espera-se que a estimativa calculada esteja dentro da margem máxima de +/- 20% de precisão.

4.4. Estudo de custos e despesas

Comparado com outras tecnologias de tratamento de RSU, o incinerador envolve um grande investimento de capital (CAPEX) e também altos custos operacionais (OPEX) (ZHANG *et al.*, 2015). O OPEX (*OPerational EXpenditure*) são

⁵ DRE: instituído no artigo 187 da Lei 6.404/1976 (Lei das Sociedades por Ações). No atual Código Civil Brasileiro, a DRE corresponde ao "resultado econômico", cujo levantamento é obrigatório conforme seu artigo 1.179. A DRE tem como objetivo principal apresentar de forma vertical resumida o resultado apurado em relação ao conjunto de operações realizadas num determinado período (BRASIL, 1976).

os gastos operacionais no horizonte da vida útil do empreendimento (em geral 30 anos para incineradores) contemplando estimativas dos principais componentes dos custos operacionais e despesas administrativas, pressupondo a prestação do serviço em regime de eficiência (BRASIL, 2016). As estimativas do OPEX devem ser fundamentadas com premissas, de preferência com uso de referências mundiais e/ou por meio de cotações atualizadas de fornecedores no mercado. O OPEX compreende custos fixos (administrativos e salários) e custos variáveis (produtos químicos para limpeza de gases de combustão, água e manuseio de águas residuais, despesas com destinação de rejeitos) e custo de manutenção (manutenção de máquinas e manutenção de edifícios) (MAISIRI *et al.*, 2015). Além disso, os custos tributários devem ser discriminados e obedecer à legislação vigente local (BRASIL, 2016).

A estimativa do OPEX total ($OPEX = O = \sum_{i=1}^n Oi$), tem como principais elementos: operação e manutenção (O_1), mão de obra (própria e terceiros) (O_2), combustíveis (O_3), insumos (O_4), logística de destinação dos rejeitos (O_5), seguros (O_6), Despesas Gerais Administrativas (DGA) (O_7), impostos (custo tributário) (O_8), e provisionamento do custo de desmobilização (O_9) (EHRHARDT e BRIGHAM, 2010).

Para incineradores o custo de desmobilização (descomissionamento) deve ser incluído nas projeções. Para certas instalações (como aterros sanitários), os custos de encerramento, de manutenção e de monitoramento após o encerramento da instalação devem ser considerados, bem como parte do valor residual no final do período de referência (EC, 2014). Os custos pós fim das operações do aterro se estendem por em torno de 30 anos e para os incineradores se encerram logo após o descomissionamento.

O total de gastos deve considerar uma provisão para contingências relativas aos custos das medidas mitigadoras e compensatórias de natureza social e ambiental, que opcionalmente, em vez de ser parte dos investimentos, podem ser incluídos nos custos e despesas, a menos que haja uma disposição diferente no instrumento contratual. Além disso, os custos tributários devem ser discriminados e devem estar em conformidade com a legislação local atual.

Como os custos operacionais da planta de incineração com recuperação energética são muito altos, é importante que o dimensionamento de sua capacidade operacional seja adequado à demanda real, pois a capacidade excedente (ociosa) pode onerar o custo anual da dívida (juros e amortização), comprometendo a eficiência financeira. A planta de incineração com recuperação energética não opera

24 horas por dia durante o ano inteiro devido a paradas programadas necessárias para realizar inspeções e reparos. Geralmente, na fase de concepção, assume-se um fator de 90% de disponibilidade da planta (isto é, 8.000 horas por ano) e a vida útil da planta de 30 anos (GANDOLLA, 2013; THEMELIS *et al.*, 2013).

Problemas de corrosão elevam o OPEX e são frequentemente associados à incineração e os gases de combustão que contêm várias impurezas (especialmente cloreto de hidrogênio, sais de cloreto e óxidos de enxofre) que resultam em taxas de corrosão muito altas dos refratários e paredes externas dos tubos da caldeira (ZHANG *et al.*, 2015). O cloro e o enxofre têm sido considerados elementos-chave no processo de corrosão (BANKIEWICZ *et al.*, 2012).

Um dos fatores críticos para o setor de incineração são as características térmicas dos RSU de entrada (COELHO, 2020) que, se na operação, forem diferentes das previstas em projeto, podem gerar custos adicionais. A caracterização dos resíduos é um fator crítico desde o projeto da planta, que tem que ser analisado antes da escolha da tecnologia. Se a composição dos RSU de entrada for diferente daquela para a qual a planta foi projetada (por exemplo, menor poder calorífico inferior), os equipamentos poderão degradar mais rápido e poderão ter dificuldades para atender a padrões rigorosos de emissões (GIZ, 2017). Com a alimentação de RSU sendo altamente heterogênea, as características térmicas estão sujeitas a grandes variações e isso, por sua vez, afeta a saída de energia da planta e os custos de operação. As características também estão sujeitas a variações sazonais, que podem afetar consideravelmente a incinerabilidade dos RSU. Nos incineradores de Lipor e Valorsul, é requerido com frequência o uso de combustível auxiliar pois o poder calorífico do resíduo é baixo em comparação com os valores da Suíça (conforme tabela 5) e, inclusive, mais baixo em comparação com outros países da Europa e o EUA, conforme tabela 7.

Além disso, a falta de experiência e mão de obra capacitada local para a operação da planta irão adicionar um desafio extra (COELHO, 2020). O número médio de empregos diretos criados por uma planta de incineração na Europa é de 62 (CHALIKI *et al.*, 2016). Dos incineradores visitados, os incineradores de Lipor e Valorsul tem 45 e 71 funcionários respectivamente, enquanto na Suíça o número médio de funcionários é inferior a 50.

Os custos tributários devem ser discriminados e obedecer à legislação vigente. A tabela 10 exhibe os principais impostos a serem incluídos no fluxo de caixa do projeto para uma instalação de uma planta de tratamento térmico de RSU no Rio de Janeiro.

Tabela 10: Principais impostos sobre projetos de energia no Brasil.

Imposto	Taxa	Incidência	Jurisdição
COFINS	7,6%	Receita bruta	Federal
PIS	1,6%	Receita bruta	Federal
ICMS	0%	Receita bruta	Estadual
IPI	0%	Valor do produto	Federal
IR	15+10%	Lucro antes dos impostos	Federal
CSLL	9%	Lucro antes dos impostos	Federal

NOTA: COFINS: Contribuição Permanente em Transações Financeiras. PIS: Programa de Integração Social. ICMS: Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços. IR: Imposto de Renda CSLL: Contribuição Social sobre Lucros. IPI: Imposto sobre Produtos Industrializados (somente a União pode instituí-lo ou modificá-lo, sobre produtos industrializados no Brasil).

Fonte: EPE (2008) e BRASIL (2002b); BRASIL (2011).

O ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços) é um imposto estadual e por causa do Decreto nº 107/2002 cuja a taxa é zero (EPE, 2008). No caso do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), a incidência desse imposto não foi considerada (alíquota zero), de acordo com o Decreto nº 4.542/2002 (BRASIL, 2002b). As tarifas do PIS/COFINS (Programas de Integração Social / Contribuição para Financiamento da Seguridade Social) não são cumulativas. A incidência de Impostos Sobre Serviços (ISS) em operações relacionadas à venda de energia elétrica deve ser desconsiderada, nos termos do §3 do artigo 155 da Constituição Federal (BRASIL, 1988). Em relação à tributação das receitas de Certificados de Emissões Reduzidas (CER's), apenas o IRPJ (Imposto de Renda Pessoa Jurídica) e CSLL (Contribuição Social sobre o Lucro Líquido) são considerados.

Com a manutenção adequada, as plantas de incineração de RSU podem durar bem mais de 30 anos (CHALIKI *et al.*, 2016). O OPEX anual, relativo a planta de incineração com recuperação energética com alta tecnologia empregada pode chegar a 35% do CAPEX (RAND *et al.*, 2000). Neste estudo, para simulação de uma planta de incineração de RSU com recuperação energética no Rio de Janeiro, o OPEX calculado chegou a 28% do CAPEX, de aproximadamente US\$ 68 milhões por ano. Para a análise financeira, foi considerado uma margem de erro de +/- 20%, assim como para o CAPEX.

4.5. Estudo das receitas

Em projetos de gerenciamento de RSU, as fontes típicas de receitas são (EC, 2014):

- a) A aplicação de encargos aos usuários, seja na forma de cobrança de destinação final ou impostos;
- b) A venda de subprodutos como composto, materiais reciclados, combustível derivado de resíduos ou combustível sólido recuperado e;
- c) A venda da energia recuperada, como calor e eletricidade, incluindo, se quando aplicável, o bônus para eletricidade produzida a partir de frações de resíduos renováveis.

Se o projeto abranger apenas um segmento do sistema de gestão de resíduos (por exemplo, incineração com recuperação energética), um preço pelo serviço prestado será cobrado das entidades (municípios, consórcio municipal, etc.) que enviam os resíduos para serem processados no incinerador e os valores recebidos serão considerados como receitas do projeto (EC, 2014).

A análise das receitas deve considerar o ciclo de vida útil do projeto que, para incineração, é usualmente de trinta anos, e deve contemplar a quantificação das receitas emergentes da prestação dos serviços (BRASIL, 2016). A receita total (Receita = $R = \sum_{i=1}^n Ri$) corresponde aos acréscimos de benefícios econômicos relativos as operações (FAS, 2002). De forma geral, para projetos de tratamento térmico de RSU com recuperação energética, as principais fontes de receita para um incinerador são a tarifa recebida por tonelada de RSU tratado (R_1), a venda de eletricidade (R_2) e/ou energia térmica (R_3), a venda de metais (escória) (R_4), e a comercialização das cinzas residuais para fins de construção (R_5), sendo esta alternativa dependem da legislação local. Além disso podem ocorrer potenciais receitas adicionais dos créditos de carbono gerados (R_6). Mas como essas receitas, por si só, podem não ser suficientes para viabilidade financeira, podem ser então necessárias taxas adicionais ou subsídios para cobrir todos os custos (GIZ, 2017). Além dos preços de mercado, eventuais subsídios devem ser considerados, por exemplo, alguns países assimilam resíduos a um recurso renovável e qualificam a incineração com recuperação de energia como energia verde (COSSU e MAIS, 2013). Segundo Consonni *et al.* (2011), uma planta para tratamento de resíduos pré-selecionados pode recuperar 2-3 vezes mais eletricidade/calor do que uma planta

tradicional para tratamento de resíduos brutos. As despesas e investimentos necessários para construir uma planta de tratamento térmico de RSU podem superar a receita da venda de energia e *gate fee*, e por isso receitas complementares são importantes.

A redução da volatilidade do preço de venda de energia e a adequação da tarifa recebida por tonelada de RSU tratado são fatores críticos para a viabilidade econômica (GIZ, 2017) e, inclusive por isso, são consideradas na análise de sensibilidade. A volatilidade do preço da energia elétrica no mercado é consequência do modelo de comercialização (contratação multilateral, leilões regulados como no caso do Brasil, etc.) praticado em cada país e impacta diretamente a projeção de receitas para a viabilidade econômica, podendo ser mitigada por meio da adoção de contratos de fornecimento de energia de longo prazo, como no caso dos incineradores visitados de Portugal. Nos EUA, embora algumas operações de incineradores estejam se mantendo, não estão surgindo novos incineradores por causa dos baixos preços de eletricidade e o consequente cancelamento de contratos iniciais de compra de energia (KARIDIS, 2019).

O incinerador de Valorsul em Portugal além de obter uma doação de 54% do investimento total (CAPEX) da União Europeia, ainda possui um subsídio de tarifa especial “verde” da eletricidade produzida no valor de 84 euros por MWh (COELHO, 2020). Na China, a rede elétrica é obrigada a utilizar eletricidade gerada pelo incinerador a um preço especial que inclui um subsídio (RABL e SPADARO, 2002; CHINA RESEARCH AND INTELLIGENCE, 2014). O Reino Unido, a Itália e a Espanha, entre outros países, apoiaram a incineração por meio de preços elevados para a eletricidade gerada nas plantas.

Em relação à tarifa recebida por tonelada de resíduo tratado, o valor mínimo para a viabilidade financeira do incinerador pode ser superior ao praticado para disposição dos RSU em aterros em operação no país. Nos Estados Unidos os valores médios das tarifas para incineração de RSU são da ordem de US\$ 60-110 por tonelada (EREF, 2017). Ao contrário de muitos países europeus, os Estados Unidos não usam, na mesma medida, as regulamentações governamentais para aumentar artificialmente o preço dos resíduos em aterros. No Reino Unido o valor é de 104 US\$ por tonelada (WRAP, 2018) e na Suécia é de US\$ 84 por tonelada (WORLD ENERGY COUNCIL, 2016). Nos incineradores da Suíça as tarifas são acima de US\$ 100 por tonelada. Em Portugal as tarifas estão entre 27-40 US\$ por tonelada, inferior à média

da UE, em função do país possuir uma média salarial inferior; de não haver imposto sobre resíduos ou aterros; além de grande parte da infraestrutura ter sido financiada pela UE ou pelo banco europeu de investimento com baixas taxas de juros.

Para simulação da planta de incineração no município do Rio de Janeiro, foram consideradas as três principais receitas: a venda de eletricidade (energia elétrica), a tarifa recebida por tonelada de resíduo tratado (*gate fee*) e a venda de metais. A possível receita com a venda de escória para produção de asfalto ou cinzas como inertes para a indústria da construção civil não foi considerada no presente estudo por estas utilizações ainda estarem em discussão em diversos países. Em relação à venda de vapor, é importante destacar que atualmente não há aquecimento urbano nem comercialização de vapor estruturado no Rio de Janeiro. Foi considerado para o presente estudo que a turbina produzirá o máximo de eletricidade possível.

4.5.1. Venda de eletricidade

A venda de energia (eletricidade e / ou térmica) pode ser considerada a fonte de receita mais importante das instalações das plantas de incineração com recuperação energética pela sua representatividade. No Brasil, os preços de venda energia têm seu próprio grau de variabilidade em função da modalidade de comercialização que é baseada em leilões regulados de venda de energia.

Conforme já visto, o poder calorífico inferior dos RSU no Rio de Janeiro foi estimado em 9.832 kJ / kg. Segundo Rodriguez (2011), assumindo que as perdas de calor, as cinzas e os gases são de cerca de 10%, o calor no vapor que entra na turbina é equivalente a 2,6 MWh por tonelada de resíduos. Além disso, assumindo uma temperatura de 400° C e pressão de 40 bar (RODRIGUEZ, 2011), a eficiência térmica da turbina dos incineradores com recuperação energética é estimada em 28%. Assim, podem ser produzidos cerca de 0,7 MWh de eletricidade por tonelada de resíduos. Para os fins deste estudo, estimou-se que a instalação consumiria 15 % de eletricidade, implicando que 0,6 MWh / tonelada será exportado para a rede. Como a planta irá processar 270.000 toneladas / ano, a produção líquida de eletricidade do incinerador é estimada em 146 GWh.

Conforme citado anteriormente, a volatilidade do preço da energia elétrica no mercado brasileiro é consequência do modelo de comercialização de energia que ocorrer através de leilões regulados. Destarte, essa volatilidade impacta diretamente a projeção de receitas para a viabilidade econômica e pode ser mitigada por meio da

adoção de contratos de fornecimento de energia a longo prazo. Segundo Loureiro *et al.* (2013), no Brasil as tarifas de energia elétrica cobradas pelos geradores são fixadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) através de leilões. De acordo com o Leilão realizado em dezembro de 2017, o preço da eletricidade produzida por energia renovável de empreendimentos situava-se entre US\$ 68 / MWh e US\$ 134 / MWh, que foram os valores utilizados na simulação deste estudo.

4.5.2. Tarifa para o tratamento

A tarifa por tonelada (*gate fee*) é o pagamento que sistemas de tratamento e disposição final de resíduos como os aterros sanitários ou as plantas de incineração com recuperação energética recebem por tonelada de resíduos tratados ou dispostos. É uma fonte muito importante de receita e, conseqüentemente, para a lucratividade do projeto do incinerador de RSU com recuperação energética. O *gate fee* é pago e previsto no orçamento do governo e tem, como uma das fontes, a taxa de coleta de resíduos cobrada dos residentes. Segundo ABRELPE (2018), mais da metade dos municípios brasileiros (52,3 %) cobra uma taxa de coleta de resíduos, incluída no IPTU (Imposto Predial e Territorial Urbano), e não considera as quantidades coletadas nas unidades residenciais. Há uma porcentagem de municípios que não cobram nenhuma taxa específica pela administração dos RSU e os recursos para financiar o sistema provêm do orçamento geral dos municípios.

O *gate fee* é um índice muito sensível, altamente dependente da economia local, da estrutura de gerenciamento de resíduos e das regulamentações governamentais que podem prover incentivos. Geralmente, o *gate fee* para um incinerador é mais alto do que o para um aterro sanitário devido ao alto CAPEX da planta de incineração com recuperação energética (BNDES, 2014). Os custos atuais de disposição em aterros sanitários no Rio de Janeiro são de US\$ 15/t para RSU (COMLURB, 2017; ENVIRONMENTAL RESEARCH & EDUCATION FOUNDATION, 2019). Segundo o BNDES - Banco Brasileiro de Desenvolvimento (2014), a incineração é aconselhável para o tratamento térmico de grandes quantidades de resíduos sólidos (mais de 160.000 toneladas / ano ou 240 toneladas / dia). O retorno econômico do uso da planta de incineração com recuperação energética mostra apenas um retorno financeiro nos casos e que, além da comercialização de energia elétrica e térmica, as tarifas de disposição final são cobradas acima de US\$ 76,55 /

tonelada, com capacidade máxima de 650 tonelada / dia e US\$ 45,93 / tonelada com capacidade máxima de 1.300 tonelada / dia (BNDES, 2014). Na análise de sensibilidade a seguir, o *gate fee* (US\$ / tonelada) foi variado entre 30 a 120 US\$ / tonelada, e o cenário base no presente estudo foi estabelecido no valor de 60 US\$ / tonelada.

4.5.3. Venda de metais

A quantidade de metais ferrosos e não ferrosos recuperada foi considerada para este estudo, em cerca de 50 % para ferrosos e 8 % para não ferrosos (SUNK e THEMELIS, 2008). Segundo a COMLURB (2017), os percentuais de metais ferrosos e não ferrosos nos RSU do Rio de Janeiro são de 1,30 % e 0,20 %, respectivamente. A parcela de metais ferrosos e não ferrosos recuperáveis considerada no estudo é equivalente a 0,65 % e 0,02 % dos RSU, respectivamente. Os valores de preços de vendas de metais são muito voláteis. No ano de 2018, os preços dos recicláveis no Brasil estavam em torno de US\$ 0,8 / kg para alumínio e US\$ 3,7 / kg para cobre. Para efeitos do presente estudo, foi assumido que os metais não-ferrosos recuperados a partir da planta de incineração com recuperação energética podem ser vendidos por cerca de US\$ 1,5 / kg e os metais ferrosos recuperado a partir da planta de incineração com recuperação energética podem ser vendidos por cerca de US\$ 0,6 / kg de acordo com o comércio de sucata no Brasil.

4.6. Avaliação econômico-social

Em projetos que possuam impacto direto em mais de 100 (cem) mil pessoas, recomenda-se a elaboração de estudo econômico-social que contemple os aspectos relacionados a identificação de benefícios e custos econômicos, estimativa das externalidades positivas e negativas do projeto, e identificação do custo de oportunidade do poder público, por meio da taxa de desconto social ou outro método tecnicamente justificado (BRASIL, 2016). Nos projetos dos incineradores com recuperação energética devem ser considerados os riscos ambientais, como poluição do ar, as cinzas tóxicas, entre outros. As operações requerem controles eficazes e eficientes para evitar a emissão de poluentes nocivos no ar, terra e água.

As visões conflitantes relativas à associação entre incineradores e os efeitos nocivos na saúde estão relacionadas a tecnologias já ultrapassadas e não aos

processos e tecnologias modernas nos incineradores com recuperação energética (GIUSTI, 2009).

A incineração no mundo, pode ser caracterizada através de 4 gerações ou estágios de desenvolvimento das plantas. A 4ª geração, a qual pertencem os seis incineradores visitados, teve início nos anos 1990 e está em vigor até os dias atuais, onde passou a ser empregada uma série de equipamentos responsáveis pela redução da emissões e remoção de outros poluentes como o dióxido de nitrogênio (NO₂), dioxinas e furanos, com controle ambiental marcado por legislações mais restritivas (NZIHOU *et al.*, 2012).

Na UE a diretiva 2010/75/EC de prevenção e controle integrado da poluição (IPPC - *Integrated Pollution Prevention and Control*) visa reduzir as emissões no ar, água e terra e prevenir a geração de resíduos, a fim de alcançar um alto nível de proteção do meio ambiente, estabelecendo limites de emissões específicos (UE, 2010). A legislação Suíça (OFEV, 2018) e a diretiva 2010/75/EC da UE (UE, 2010), (aplicadas aos incineradores visitados) estão entre os padrões mais rigorosos para a incineração de RSU no mundo (YAN *et al.*, 2020).

O incinerador visitado da Tridel (Suíça) obteve, nas duas linhas, valores médios dos parâmetros (ácido clorídrico, ácido fluorídrico, dióxido de enxofre, nitrogênio amoniacal, mercúrio, cádmio, chumbo + zinco e monóxido de carbono) no mínimo 88% abaixo dos valores limites estabelecidos pela legislação Suíça e também da legislação europeia nos anos de 2017, 2018, 2019 (TRIDEL, 2019). A legislação ambiental da China e outros países em desenvolvimento tem padrões de exigências, em certos parâmetros, inferiores aos da UE, conforme apresentado na tabela 3. Assim, para incluir a incineração de RSU em seus sistemas de gestão de resíduos, os países em desenvolvimento devem revisar suas legislações a fim de seguir legislações mais rigorosas de controle de emissões como as adotadas na UE.

O setor de incineração de resíduos tem sido objeto de extensos requisitos legislativos a nível regional, nacional e europeu há muitos anos. Para além dos requisitos da diretiva 2010/75/EC, o setor da incineração (e associados) também está sujeito aos requisitos de legislação específica. No momento, as seguintes diretivas da UE estão em vigor para instalações de incineração de resíduos (UE, 1989a; UE, 1989b; UE, 1994; UE, 2000):

- Diretiva 89/369/EEC para novas instalações de incineração de resíduos municipais;

- Diretiva 89/429/EEC para instalações existentes de incineração de resíduos municipais;
- Diretiva 94/67/EC para a incineração de resíduos perigosos (incluindo cogeração);
- Diretiva 2000/76/EC para a incineração de resíduos (incluindo a cogeração).

É de notar que a diretiva 2000/76/CE revoga progressivamente as três primeiras diretivas. Esta diretiva define os requisitos mínimos em relação às emissões permitidas, monitoramento e certas condições operacionais. Em 1975, com a diretiva 75/442/EEC, a União Europeia (UE) introduziu o conceito de hierarquia de resíduos na política europeia de resíduos. A relevância da minimização de resíduos é enfatizada e as ações políticas precisam ser regulamentadas para garantir um alto nível de proteção ao meio ambiente e à saúde humana. Embora desde 1989 a diretiva 89/369/EEC da Comunidade Econômica Europeia estabeleça condições específicas para o licenciamento de instalações de incineração, desde 2000, a diretiva 2010/75/EC começou a regular o assunto, tornando essas condições ainda mais restritivas. A diretiva 2010/75/EC (IPPC) visa reduzir as emissões no ar, solo, água e terra e prevenir a geração de resíduos, a fim de alcançar um alto nível de proteção do meio ambiente. A diretiva estabeleceu os principais requisitos para a operação de uma planta de incineração: uma temperatura mínima de combustão e tempo de residência dos produtos de combustão resultantes; limites de emissão específicos para: SO₂; óxido de nitrogênio e dióxido de nitrogênio (NO e NO₂); HCl; HF; substâncias orgânicas gasosas e vaporosas, expressas como carbono orgânico total (TOC); monóxido de carbono (CO); poeira; metais pesados; e dioxinas e furanos; um limite de 3% para o teor de carbono orgânico das cinzas e da escória produzida.

Os projetos de gestão de resíduos podem produzir diferentes benefícios e custos sociais, dependendo da tipologia específica do projeto implementado em comparação com o cenário contra factual (EC, 2014).

Os principais efeitos diretos e externalidades normalmente associados à construção, modernização e melhoria da qualidade da gestão integrada de resíduos estão resumidos no quadro 2, juntamente com os diferentes métodos de avaliação sugeridos (EC, 2014).

Impacto	Tipo	Método de avaliação
Economia de recursos: evitou resíduos em aterro	Efeito direto	Custo Marginal de Longo Prazo ^a de disposição em aterro
Economia de recursos: recuperação de materiais recicláveis e produção de composto	Efeito direto	Valores de mercado
Economia de recursos: recuperação de energia	Efeito direto	Custo Marginal de Longo Prazo da energia substituída
Desamenidades visuais, ruído e odores	Externalidade	Preço hedônico ^b Preferências declaradas ^c
Variação nas emissões de GEE	Externalidade	Preço sombra ^d das emissões de GEE (Gases Efeito Estufa)
Riscos à saúde e ambientais (variação na contaminação do ar, água e solos)	Externalidade	Preço sombra dos poluentes

^a Para a avaliação de alguns produtos, quando a abordagem “Disposição a Pagar” não é possível ou relevante, o custo marginal de longo prazo pode ser a regra contábil padrão. Normalmente, a “Disposição a Pagar” é maior do que o custo marginal de longo prazo em estimativas empíricas e, às vezes, uma média das duas é apropriada.

^b Método do preço hedônico mede o custo econômico da exposição adicional ao ruído com o (menor) valor de mercado dos imóveis.

^c O método recomendado é a preferência declarada para uma medição direta de compensação “Disposição para Aceitar” ou “Disposição a Pagar” para redução de ruído. Os custos de ruído variam dependendo da hora do dia, da densidade populacional próxima à fonte de ruído e do nível de ruído existente.

^d Quando os preços de mercado não refletem o custo de oportunidade dos insumos e produtos, a abordagem usual é convertê-los em preços sombra a serem aplicados aos itens da análise financeira.

Quadro 02: Principais efeitos diretos e externalidades a serem considerados para projetos em gerenciamento de resíduos.

Fonte: World Bank (2012c).

No tocante à questão social, a implementação de incineradores nos países em desenvolvimento apresenta desafios como aqueles relacionados à aceitação por parte da população local, que desconhece a tecnologia e a vê como uma fonte de poluição (VERGARA e TCHOBANOGLIOUS, 2012). O projeto do incinerador de Valorsul em Portugal enfrentou várias críticas da população local, e percebeu-se que, após a construção da planta, não houve mais críticas em função do esforço de disseminação adequada de informações para a sociedade local (COELHO, 2020). Com isso, a adequação do arcabouço legal se torna um fator crítico, pois uma legislação adequada que inclua os principais aspectos a serem atendidos por este tipo de tecnologia é um pré-requisito para a introdução dos incineradores nos países em desenvolvimento (UN ENVIRONMENT, 2019). A legislação específica para o licenciamento de instalações de incineração precisa ser atualizada/elaborada, bem como os padrões técnicos para

orientarem os projetos de incineradores e critérios para a concessão de licenças ambientais.

Além disso, deve ser regulamentada uma legislação nacional que estabeleça as condições para o controle de emissão de poluentes nas instalações de processamento térmico, tão restritiva quanto as recomendadas atualmente pela UE. A legislação deve cumprir os limites de emissões reconhecidos internacionalmente para evitar danos ao meio ambiente e à saúde pública (GIZ, 2017). Para isto, um importante desafio é o apoio político, pois é a base para qualquer avanço no gerenciamento de resíduos (RAGOSSNIG e VUJIÉ, 2015).

As unidades de incineração de resíduos com recuperação energética no Brasil, estão sujeitas às disposições da Resolução CONAMA nº 316/2002, que regulamenta os métodos de tratamento térmico de resíduos (BRASIL, 2000). Conforme mostrado na tabela 11, resolução 079 de 2009 da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo estabelece condições para o controle da emissão de poluentes em plantas de processamento térmico de RSU (SMA, 2009), tão restritivas quanto as preconizadas pela UE, por meio da diretiva 2000/75/EC.

Tabela 11: Principais condições no Brasil e UE para controle de emissão de poluentes em plantas de processamento térmico de RSU.

Parâmetros (mg/Nm³)	UE 2010/75/EC	SMA/SP 079/09	CONAMA 316/2002
Matéria particulada	10	10	70
Cloreto de hidrogênio	10	10	80
Sb (Antimônio) + As (Arsênio) + Pb (Chumbo) + Cr (Crômio) + Co (Cobalto) + Cu (Cobre) + Mn (Manganês) + Ni (Níquel)+ V (Vanádio)	0,5	0,5	-
Mercúrio	0,05	0,05	-
Fluoreto de hidrogênio	1	1	5
Dioxinas e furanos ¹	0,1	0,1	0,5

(1) Em ng TEQ

Fonte: CONAMA nº 316 (BRASIL, 2000); SMA nº 79 (SMA, 2009) e Diretiva 2010/75/EC (UE, 2010)

As plantas de tratamento térmico de RSU com recuperação energética apresentam potenciais riscos ambientais, como poluição do ar e cinzas tóxicas. Essas plantas requerem controles efetivos e eficientes para evitar a emissão no ar, terra e água de poluentes nocivos. Apesar de sua importância, o presente estudo não avaliou detalhadamente a questão dos impactos na saúde em relação às instalações das

plantas de incineração com recuperação energética. Os efeitos estão principalmente relacionados aos incineradores de tecnologia anterior e menos às instalações modernas, que podem reduzir os poluentes do ar com um impacto mínimo na saúde pública e que estão em conformidade com a legislação atual da União Europeia (UE), de controle ambiental (GIUSTI, 2009). A implementação de plantas de incineração com recuperação energética nos países em desenvolvimento apresenta desafios como as dificuldades de adaptação às condições locais, aceitação do público e o risco de falhas desperdiçando recursos importantes (VERGARA e TCHOBANOGLIOUS, 2012).

A oposição pública é frequentemente um grande obstáculo para projetos térmicos de incineradores nos países desenvolvidos e em desenvolvimento e a aprovação pública, ou "licença social", deve ser obtida para se construir uma planta de incineração com recuperação energética (UN ENVIRONMENT, 2019). Por outro lado, embora ainda não seja possível mensurar, existem várias frentes contrárias à incineração no Brasil. Um dos maiores estados do Brasil, Minas Gerais, desde 2014, possui a lei nº 21.557 (MINAS GERAIS, 2014) que proíbe o uso da tecnologia de incineração no processo de destinação final de RSU. No Brasil, entre as possíveis razões para a forte rejeição da tecnologia de incineração de resíduos podem ser listadas:

- Falta de informação e conhecimento técnico (mesmo em universidades e instituições de gestão de resíduos);
- Riscos de impactos ambientais resultantes de problemas operacionais durante a operação;
- Risco de aquisição de tecnologias obsoletas (menor CAPEX) com níveis mais elevados de emissões e;
- Percepção de que o RSU da incineração pode reduzir a disponibilidade de materiais recicláveis para uma população significativa de catadores que vivem coletando esses materiais.

4.7. Estudo do modelo de negócio

De acordo com a Portaria nº 557, de 11 de novembro de 2016, o estudo do modelo de negócios contempla os seguintes aspectos:

- Estudo de alternativas contemplando a avaliação dos diversos modelos contratuais;
- Justificativa do modelo contratual escolhido, demonstrando suas vantagens sociais, ambientais e econômicas no curto, médio e longo prazo;
- Modelo de gestão (definição do escopo de atividades e serviços que devem ficar a cargo do contratado);
- Modelo legal do contrato;
- Simulação da matriz de riscos (identificação dos riscos associados ao projeto, das partes que devem apoiá-los e das medidas de mitigação);
- Indicadores de desempenho (devem ser descritos, justificados e ter sua metodologia de cálculo estabelecida de forma a evitar redundância ou irrelevância do indicador, e ser acompanhados do valor ou faixa de valores em que o serviço é considerado satisfatória, parcial ou que não está sendo minimamente cumprido).

A Portaria nº 557 recomenda que o estudo do modelo de negócio contemple a análise das alternativas e avaliação dos diversos modelos contratuais, incluindo a justificativa do modelo contratual escolhido e demonstrando suas vantagens sociais (BRASIL, 2016). Com as restrições no investimento público nos países em desenvolvimento, cada vez mais as Parcerias Público Privadas (PPP) vêm sendo instrumentos de viabilização de projetos de saneamento básico. Um modelo de negócios adequado é essencial para atrair investidores privados, em especial, nos países em desenvolvimento que possuem limitações orçamentárias para o investimento público. Diferentes modelos de negócios estão em vigor em diferentes países e cidades, incluindo entre outros, o de construção, operação e transferência (BOT - *Build, Operate and Transfer*) e a propriedade total do estado com taxas e subsídios (YAN *et al.*, 2020). A incineração na UE começou praticamente no setor público, com a exceção da França, onde a delegação para empresas privadas constituiu uma formação para todos os serviços locais (MASSARUTTO, 2007). Na UE, no final dos anos 90 e início do século 21, houve uma tendência para um amplo envolvimento do setor privado. Na China, não houve participação pública quando as plantas de incineração foram desenvolvidas inicialmente (ZHANG *et al.*, 2015).

Com relação a modelo de negócios mais utilizado na criação das plantas de incineração com recuperação energética, não foi possível encontrar nenhuma análise abrangente e detalhada na bibliografia. Países que usam PPP's também têm diferentes características nos seus modelos (BONOMI e MALVESSI, 2008). Os modelos de negócios dependem do país, do orçamento financeiro e do nível em que está disposto e seja capaz de subsidiar o incinerador para assegurar a viabilidade a longo prazo (YAN *et al.*, 2020). Não há uma análise abrangente da estrutura institucional para um incinerador de RSU, mas o World Bank (1999a) fornece uma descrição detalhada dos modelos e contratos de gestão mais frequentes, que variam dos contratos mais clássicos de compra até arranjos mais sofisticados, nos quais para o contratado os deveres se estendem ao projeto, operação e até aos riscos financeiros, são eles: contratos *turnkey*, BOT (*Build-Operate-Transfer*), BOOT (*Build-Own-Operate-Transfer*), BO (*Build-Operate*), DBO (*Design-Build-Operate*).

Os bons modelos de negócios atendem o financiamento adequado com uma política clara e possuem uma rápida penetração no mercado (WORLD BANK, 2012b). Existe uma lacuna na literatura internacional sobre evidências de diferença de desempenho entre sistemas operados por serviços públicos e privados e qual seria mais apropriado para situações específicas (SOÓS *et al.*, 2017). Uma conclusão geral é que uma combinação de prestadores de serviços públicos e privados pode contribuir para uma estrutura mais resiliente para soluções de gestão sustentável e o sucesso do projeto deve atender os interesses da sociedade e de ambos setores (PASIN *et al.*, 2003). Nos Emirados Árabes Unidos, o maior projeto de incinerador será executado através de PPP e as duas plantas irão gerar cerca de 150 MW de eletricidade. A planta em Abu Dhabi deve processar 900.000 toneladas / ano de RSU e o de Al Ain 600.000 toneladas / ano (ECOPROG, 2020).

Um dos fatores críticos é a seleção de modelo de negócio adequado. Uma das vantagens da adoção das PPP's é que elas viabilizam projetos financeiramente, sendo os riscos de conclusão e resultados do projeto compartilhados com o governo e o operador/investidor privado (UN ENVIRONMENT, 2019). Uma das vantagens da utilização das parcerias é que o governo pode continuar atuando, de acordo com o contrato de concessão, na modalidade patrocinada ou administrativa (CARVALHO FILHO, 2016). Apesar disso, no Brasil apenas 15 % das concessões e projetos de PPP propostos terminam na assinatura dos contratos (FIRJAN, 2019).

É importante destacar que as PPP's são conceitos relativamente novos no Brasil, uma vez que foram formalizadas em 2004 com a Lei 11.079/046, e que difere da Lei 8.987/95 de 1995 que dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos, mas tratando unicamente com concessões. Os países podem possuir diferentes características nos modelos de PPP's, como no caso dos países onde a escolha de aplicações de recursos públicos é decidida em conselhos ou legislaturas e os desembolsos são feitos através exclusivamente do poder executivo (BONOMI e MALVESSI, 2008).

O investimento em infraestrutura pública é considerado fundamental para o crescimento econômico, pois incentiva os investimentos privados. Os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS (2018), mostram uma queda de 7,8% nos investimentos do setor em 2017 em comparação ao ano anterior. Em 2018 foi desembolsado para saneamento o menor valor nesta década e 50,5% abaixo da média necessária para o Brasil universalizar os serviços até 2033, conforme a meta estabelecida pelo Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab) (SNIS, 2018).

No Brasil, de acordo com o Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão, nas leis brasileiras as parcerias público-privadas são contratos administrativos de concessão, na modalidade patrocinada ou administrativa. A Lei 11.079/04 estabelece como características básicas das parcerias público-privadas o valor do contrato igual ou superior a R\$20.000.000,00 (vinte milhões de reais); com período de prestação de serviço igual ou superior a 5 (cinco) anos; a contratação conjunta de obras e serviços e a existência de contraprestação pecuniária do parceiro público ao parceiro privado conforme art. 2.º, §3.º (BRASIL, 2004b).

A concessão patrocinada é a concessão de serviços públicos ou de obras públicas de que trata a Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995, quando envolver, adicionalmente à tarifa cobrada dos usuários contraprestação pecuniária do parceiro público ao parceiro privado conforme lei 11.079/04, art. 2.º, §1.º (BRASIL, 2004b).

Nas concessões patrocinadas a remuneração do parceiro privado se dá por meio de tarifa cobrada aos usuários, complementada por contraprestação pública que exerce função de subsídio ou patrocínio. A contraprestação pública na concessão patrocinada se destina a viabilizar financeiramente projeto de interesse público no qual a iniciativa privada não teria interesse em executar sem remuneração adicional à

tarifa, quer pelo custo de implantação e operação quer pela necessidade de modicidade tarifária do serviço público a ser prestado à população.

A concessão administrativa é o contrato de prestação de serviços de que a Administração Pública seja a usuária direta ou indireta, ainda que envolva execução de obra ou fornecimento e instalação de bens conforme a Lei 11.079/04, art. 2.º, §2.º (BRASIL, 2004b).

Nas concessões administrativas a remuneração do parceiro privado se dá por meio de contraprestação pública, sem cobrança de tarifas dos usuários. Segundo o Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão, a nomenclatura legal para as parcerias público-privadas as divide em "concessões administrativas" e "concessões patrocinadas" (Lei 11.079/2004, art. 2.º, §§ 1.º e 2.º). Entretanto, nas discussões sobre a modelagem de projetos tais expressões legais podem ser consideradas insuficientes para transmitir informações relevantes para a análise técnica, daí ser comum o emprego de nomenclatura complementar para melhor se identificar a estrutura da modelagem adotada (BRASIL, 2004b). Em outras palavras, nomenclatura que reflita a estrutura das obrigações e serviços transferidos ao concessionário.

Na modelagem da PPP é importante observar que a Lei 11.079/2004, art. 2.º, §4.º, proíbe a celebração de contrato de parceria público-privada que tenha como objeto único o fornecimento de mão-de-obra, o fornecimento e instalação de equipamentos ou a execução de obra pública (BRASIL, 2004b).

Na prática internacional é comum se indicarem por siglas as diferentes modelagens de parcerias público-privadas conforme a extensão da transferência de funções à iniciativa privada. A seguir alguns exemplos de modelagens de Parcerias Público-Privadas compatíveis com a legislação brasileira:

- DBFO (*Design-Build-Finance-Operate*). Por estas siglas se identificam projetos nos quais o parceiro privado é responsável pelo desenho dos projetos de arquitetura e engenharia, construção, financiamento e prestação de serviços relacionados à PPP (por exemplo, a construção de um hospital com a prestação de serviços clínicos à população).
- DBFM (*Design-Build-Finance-Maintenance*). Nesse caso, há delegação ao parceiro privado das funções de desenho dos projetos de arquitetura e engenharia, construção, financiamento e prestação de serviços relacionados à manutenção da infraestrutura, conservação, vigilância, limpeza, alimentação.

- BOT (*Build-Operate-Transfer*) ou BOOT (*Build-Own-Operate-Transfer*), BTO (*Build-Transfer-Operate*). Esta nomenclatura é utilizada quando é relevante identificar a propriedade dos ativos construídos. As siglas BOT e BOOT são utilizadas muitas vezes como sinônimas. A principal diferença entre os projetos BOT e BOOT se refere ao momento de transferência ao poder público da propriedade dos ativos vinculados à concessão ("bens reversíveis"). Nos projetos BOOT a transferência dos ativos se dá ao término do contrato, enquanto nos projetos BOT a transferência se dá logo após a conclusão da construção.
- ROT (*Refurbish-Operate-Transfer*). Em qualquer das nomenclaturas acima a construção ("*built*") pode ser substituída pela reabilitação ou reforma ("*rehabilitate*" ou "*refurbish*") de bem público previamente existente. Nesse caso, refere-se a projetos com infraestrutura já existente, mas que demanda atualização das instalações para pleno atendimento dos serviços e indicadores de desempenho previstos no contrato.

Todas as modelagens de parcerias público-privadas citadas também podem descrever casos de concessões de serviços públicos precedidas da execução de obra pública (Lei 8.987/95, art. 2.º, III) se não houver contraprestação pecuniária do parceiro público ao parceiro privado (Lei 11.079/2004, art. 2.º, §4.º) (BRASIL, 1995; BRASIL, 2004b). Os contratos O&M (*Operation-Maintenance* – operação e manutenção) se envolverem apenas o fornecimento de mão-de-obra serão considerados contratos administrativos comuns regidos pela Lei 8.666/1993 (Lei 11.079/2004, art. 3.º, §3.º), assim como quando houver a simples aquisição de equipamentos (BRASIL, 2004b). Há possibilidade de contratos de PPP com operação e manutenção, quando, para manter, houver necessidade de investimentos em reforma de bem público pré-existente como ocorre na nos contratos ROT (*Refurbish-Operate-Transfer* – reforma, operação e transferência) ou contratos somente de projeto e construção DB (*Design-Build* – projeto e construção). Até 2011, era vedada a contratação de obra e serviço do autor do projeto básico ou executivo (Lei 8.666/93, art. 9.º, I e II) (BRASIL, 1995). A partir da edição da Lei 12.462/2011, os contratos DB passaram a ser autorizados receberam a denominação legal de "Contratação integrada pelo Regime Diferenciado de Contratações" (Lei 12.462/2011, art. 9.º, §1.º), não sendo considerados PPP's (BRASIL, 2011).

Em particular, o grau de transferência de risco para o setor privado muda em cada tipo de projeto de modelo, variando de modelos com transferência de risco limitada (por exemplo, risco de operação e manutenção) até modelos com maior transferência de risco (por exemplo, risco de projeto, construção, financiamento e operações) e as seguintes etapas devem ser consideradas na análise financeira de grandes projetos implementados como uma PPP (EC, 2014): (i) sob PPP, o parceiro público é normalmente, mas nem sempre, o proprietário da infraestrutura e o parceiro privado é o operador a obter receitas através do pagamento de tarifas, devendo primeiro ser efetuada uma análise consolidada para apurar a rentabilidade global do investimento; e (ii) o retorno sobre o capital será então calculado separadamente para o parceiro privado e o parceiro público.

Em recente discussão, a Lei 14.026, de 15 de julho de 2020, atualiza o marco legal do saneamento básico e moderniza diversos trechos da legislação anterior, conferindo atribuição à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) para editar normas de regulação para o setor e introduz conceitos novos relativos a prestação dos serviços de saneamento e promovendo alteração nos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos que foram fixados pela PNRS, conforme Lei nº 12.305, de 2010, além de outras medidas (BRASIL, 2010; FILHO e SOLER, 2020).

O novo marco regulatório propões avanços importantes que favorecem a formação de PPP. Relacionados aos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos pode se destacar três principais eixos (FILHO e SOLER, 2020):

1. Sustentabilidade econômico-financeira que deverá ser assegurada por meio de remuneração pela cobrança dos serviços, a ser arrecadada pelo prestador diretamente do usuário, na forma de taxas, tarifas e outros preços públicos, conforme o regime de prestação do serviço ou das suas atividades.
2. Modernização diz respeito à modelagem a ser adotada nos casos de terceirização dos serviços de saneamento.
3. Alteração da PNRS no que se refere ao prazo para disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, implicando na eliminação dos lixões, a ser implantada até o final de 2020, limite que poderá ser dilatado e escalonado na hipótese de os municípios que até essa data tenham elaborado o plano de gestão integrada de resíduos (PGIRS) e

disponham de mecanismos de cobrança que garantam a sua sustentabilidade econômico-financeira.

O escopo do presente estudo não inclui a recomendação sobre o modelo de contratação mais adequado para um empreendimento de incineração com recuperação energética pois as alternativas são consequência das potenciais partes interessadas e parcerias em função do momento de mercado e do nível de participação governamental e propensão dos políticos.

4.8. Avaliação financeira

Conforme estabelecido no artigo 101 (Informações necessárias para a aprovação de um grande projeto) do Regulamento (UE) n.º 1303/2013, deve ser incluída uma análise financeira na análise de custo-benefício para calcular os indicadores de desempenho financeiro do projeto a fim de (EC, 2014): (i) avaliar a rentabilidade consolidada do projeto; (ii) avaliar a lucratividade do projeto para o proprietário do projeto e algumas partes interessadas principais; (iii) verificar a sustentabilidade financeira do projeto, uma condição-chave de viabilidade para qualquer tipologia de projeto; e (iv) delinear os fluxos de caixa que sustentam o cálculo dos custos e benefícios socioeconômicos.

A análise de viabilidade técnico econômica é um estudo de viabilidade que busca atestar as possibilidades de sucesso de um empreendimento, considerando aspectos técnicos, comerciais, operacionais, sociais e econômico-financeiros. A falta de modelos de viabilidade e análise financeira bem fundamentados é um dos fatores que colaboram para que os empreendimentos não avancem de acordo com o planejado, gerando resultados no período de implantação e operação diferentes dos orçados previamente.

A metodologia de análise financeira proposta, a mesma utilizada no guia de análise de custo-benefício de projetos de investimento da Comissão Europeia, é o método de fluxo de caixa descontado, de acordo com a seção III (Método de cálculo de receita líquida de operações geradoras de receita líquida) da Comissão Regulamento Delegado (UE) n.º 480/2014 (EC, 2014). Mesmo com apresentação dos principais elementos recomendados para estarem presentes na avaliação financeira na Portaria n.º 557, ainda existe uma lacuna em termos de orientação para a etapa 8 (figura 8), de avaliação financeira, e o quadro 3 apresenta uma proposta de etapas

complementares acerca da avaliação financeira-econômica.

#	Fases
8.1	Estabelecer parâmetros operacionais
8.2	Definir premissas financeiras
8.3	Elaborar DRE
8.4	Definir indicadores de rentabilidade financeira
8.5	Realizar análise de sensibilidade
8.6	Realizar análise de cenários
8.7	Realizar análise de riscos

Quadro 03: Fases para a realização da análise financeira.

Fonte: Adaptada Portaria nº 557 (2016); Gitman (2009), Gitman e Zutter (2017) e EC (2014).

4.8.1. Estabelecer parâmetros operacionais

Para estabelecer os fatores básicos considerados no estudo do valor do investimento, é necessário, preliminarmente, realizar uma avaliação da capacidade e desempenho do projeto do incinerador. Os principais parâmetros operacionais de projeto são mostrados no quadro 4.

Parâmetros operacionais	Unidade
Capacidade da planta	(t/ano)
Número de linhas	(qtd)
Vida útil da planta	(anos)
Período de construção	(anos)
Capacidade de processamento da planta por linha	(t/ano/linha)
Disponibilidade da planta	(%)
Poder Calorífico Inferior (PCI) médio dos resíduos	(kJ/kg)
Eficiência da geração de eletricidade	(%)
Eficiência da geração de vapor	(%)
Capacidade de projeto da planta	(MW)
Potência total de saída	(kWh/t)
Consumo de planta	(kWh/t)
Mão de obra total (própria + terceira)	(qtd funcionários)
Eletricidade da rede	(kWh/t)

Quadro 04: Principais parâmetros operacionais e financeiros do projeto.

Fonte: Fonte: Próprio autor (visitas técnicas 2017 e 2018).

4.8.2. Estabelecer premissas financeiras

As premissas básicas financeiras de entrada para um modelo são mostradas no quadro 5. Essas premissas são usadas como valores para o cenário base na análise financeira.

Premissas	Unidade
Custo de capital (CAPEX) por tonelada	(\$/t)
Custo de manutenção	(% do CAPEX)
Preço de venda da electricidade	(\$/kWh)
Custo por tonelada tratada	(\$/t)
Preço de venda de metais ferrosos	(\$/kg)
Preço de venda de metais não ferrosos	(\$/kg)
Taxa de depreciação	(%)
Taxa de desconto (taxa de longo prazo)	(%)
Inflação	(%)
Taxa de juro	(%)
Imposto	(%)
Percentual Financiado por instituição financeira	(% do CAPEX)
Custo médio da mão de obra (incluindo encargos)	(\$/pessoa/ano)
Despesas Gerais Administrativas (DGA)	(% do custo total da mão-de-obra)
Custo de produtos químicos ¹	(\$/t)
Custo de limpeza de gases ²	(\$/t)

(1) Sistema de controle de poluição de ar (Air Pollution Control - APC): cal, ureia, carvão ativado, etc.

(2) Sistema de limpeza de gás de combustão a seco, que consiste na lavagem a seco com cal, injeção de carvão ativado e, filtro de mangas.

Quadro 05: Principais parâmetros financeiros do projeto.

Fonte: Próprio autor (visitas técnicas 2017 e 2018).

4.8.3. Elaborar Demonstração de Resultados de Exercício (DRE)

A DRE é estruturada considerando o fluxo de caixa dos investimentos, os custos (fixos e variáveis), as despesas e as receitas, para um período de 30 anos para o incinerador. O custo do ciclo de vida de um ativo pode ser significativamente superior ao valor de investimento inicial, e deve ser avaliado através da DRE logo na fase de projeto (BESCHERER, 200; ASSAF, 2003; BRAZIL, 2008). Em projetos de gerenciamento de RSU, as fontes típicas de receitas são (EC, 2014). A estruturação da DRE deve incluir as divisões relacionadas ao modelo de negócio adotado segregando as responsabilidades financeiras e fiscais de entidades públicas e privadas.

O primeiro passo é a análise do valor e a repartição ao longo dos anos dos custos totais de investimento (classificados por investimento inicial, custos de despesas). A segunda etapa é o cálculo das receitas operacionais totais. O próximo passo é a identificação das diferentes fontes de financiamento que cobrem os custos de investimento (EC, 2014). As linhas de financiamento para esse tipo de

empreendimento geralmente são dos bancos governamentais de desenvolvimento, no caso do Brasil o BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social), por linhas de desenvolvimento próprias. As condições típicas para o financiamento do BNDES para empreendimentos de saneamento e energia consideram uma taxa de juro de 1,5 a 2,5 % + TJLP (Taxa de Juros de Longo Prazo) que está em torno de cerca de 6,75 % ao ano.

Os principais elementos de uma DRE para um projeto de planta de incineração de RSU com recuperação energética são apresentados no quadro 6.

DRE
Investimento
Equipamentos de processamento térmico (incinerador / caldeira)
Equipamentos de produção de energia (turbinas e geradores)
Sistema APC (tratamento de gases de combustão)
Prédio (obras civis)
Diversos (aprovações, obras gerais do site, processamento de cinzas, transmissão elétrica e interconexão etc.)
Receita Bruta
Receita Operacional
Gate fee
Venda de eletricidade
Venda de vapor
Receita Não Operacional
Crédito de carbono
Venda de metais (se aplicável)
Metais ferrosos
Metais não ferrosos
Impostos
Receita Líquida
Custo Operacional
Custo variável
Custo dos químicos
Custo da água
Custo da gestão de resíduos
Custo fixo
Custo de manutenção
Custo Médio de Mão de Obra
Demais custos
Resultado Bruto
Margem Bruta
Amortização
Despesa Operacional
Pessoal Administrativo
Despesas Gerais e Administrativas (DGA)
Depreciação
Lucro Operacional
Margem Operacional
Depreciação
Lucro Antes dos Impostos
Impostos
Imposto de Renda
Contribuição Social
Lucro
Fluxo de caixa
LAJIDA¹ (Lucros antes de Juros, Impostos, Depreciação e Amortização)
Margem LAJIDA

(1) Termo mais utilizado em inglês: EBITDA: Earnings before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization.

Quadro 06: Estrutura da DRE elaborada.

Fonte: próprio autor adaptado Lei das Sociedades por Ações 6.474 (1976)

Além disso, para a estruturação da DRE é necessário que um cronograma

completo do projeto seja elaborado. Segundo o PMI (2017), um cronograma estruturado é uma ferramenta essencial para o sucesso de qualquer projeto.

4.8.4. Definir indicadores de rentabilidade financeira

Como base para análises, o estudo financeiro pode focar, minimamente, mas não exclusivamente, nos indicadores tradicionais específicos para avaliação da viabilidade financeira, a saber: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e o retorno sobre o investimento (ROI – *Return Of Investment*) (GITMAN, 2009; GITMAN e ZUTTER, 2017; ROSS *et al.*, 2018) apresentados na tabela 12. O VPL de um empreendimento é definido como a soma algébrica dos valores descontados do fluxo de caixa a ele associado. A TIR é a taxa de retorno exigida que, quando usada como taxa de desconto, resulta em um VPL igual a zero (BRASIL, 2008; FILHO *et al.*, 2016; LEMES *et al.*, 2016; GITMAN e ZUTTER, 2017; ROSS *et al.*, 2018). O ROI mede a quantidade financeira de retorno de um investimento, em relação ao custo do investimento (GITMAN, 2009; GITMAN e ZUTTER, 2017). O VPL e a TIR são nomeados em grande parte da literatura financeira como os métodos mais tradicionais na avaliação de projetos de investimentos (SCHROEDER *et al.*, 2005).

Tabela 12: Principais indicadores tradicionais específicos para avaliação financeira.

Indicadores financeiros	Fórmula
VPL (em \$) (Valor Presente Líquido)	$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t}$
TIR (em %) (Taxa Interna de Retorno)	$\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} = 0$
ROI (em %) (Retorno do Investimento)	$ROI = \frac{(Receita - Custo)}{Custo} \times 100 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n Ri - \sum_{i=1}^n Ci - \sum_{i=1}^n Oi}{\sum_{i=1}^n Ci + \sum_{i=1}^n Oi} \right) \times 100$

Nota: FC = Fluxo de Caixa; I = Investimento inicial; R = Receita; C = CAPEX; O = OPEX; t = Tempo

Fonte: Gitman e Zutter (2017); Ross *et al.* (2018) e Lemes *et al.* (2016).

O cálculo do VPL, ROI e da TIR também contribui para decidir se o projeto requer apoio financeiro público: quando a TIR é inferior à taxa de desconto aplicada (ou o VPL é negativo), as receitas geradas não cobrirão os custos e o projeto precisa de assistência pública (EC, 2014). Este é frequentemente o caso das infraestruturas públicas, em parte devido à estrutura tarifária destes setores (EC, 2014).

Outro indicador que pode ser utilizado é o *Simple Payback* do período (SPB). O SBP é o período de tempo necessário para recuperar o investimento inicial em um projeto, onde é calculado a partir das entradas de caixa (SOUZA, 2003; ENERGY MANAGEMENT, 2014). Se o período máximo do SPB for maior que o período máximo de recuperação aceitável, o projeto será rejeitado (GITMAN, 2009; ROSS *et al.*, 2018).

4.8.5. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade procura estimar o resultado final de acordo com oscilações das variáveis determinantes. Em um estudo de pré-viabilidade pode-se utilizar um grau de "imprecisão" de até +/-20% como base do orçamento de investimento (UNIDO, 2019). Uma variação do investimento inicial de $\pm 20\%$ pode ter um impacto de 153% a +105% no resultado financeiro do projeto (MASSARUTTO, 2015).

A análise de sensibilidade dos resultados das análises financeiras e econômicas às mudanças no valor das principais variáveis consideradas é obrigatória (EC, 2014). A análise de sensibilidade de VPL, TIR e ROI foi realizada considerando variação nas duas principais variáveis de receita (preço de eletricidade e a tarifa por tonelada - *gate fee*) que afetam o desempenho financeiro do projeto (em alguns países pode ser considerado também o preço da energia térmica).

A análise de sensibilidade de VPL, TIR e ROI também poderia ser realizada para alterações das seguintes variáveis (EC, 2014):

- a) Composição de resíduos (por exemplo, possível redução do valor calorífico);
- b) Número de anos necessários para a realização da infraestrutura;
- c) Custos de investimento (tão desagregados quanto possível);
- d) Custos de operação e manutenção (tão desagregados quanto possível) e;
- e) Custo (evitado) de disposição em aterro.

Uma escala de atratividade de investimento foi formulada para análise dos resultados de sensibilidade do VPL, TIR e ROI e foram adotadas as faixas indicadas no quadro 7.

Indicadores	Critérios
VPL	$VPL \leq 0$: investimento não financeiramente viável
	$0 < VPL \leq \frac{1}{4}$ of Capital cost: viável mas não atraente
	$\frac{1}{4} < VPL \leq \frac{1}{2}$ do custo de capital: viável e atraente
	$\frac{1}{2}$ do custo de capital $< VPL$: viável e mais atraente
TIR	$TIR \leq 10\%$: investimento não financeiramente viável
	$10\% < TIR \leq 15\%$: viável mas não atraente
	$TIR > 15\%$: viável e mais atraente
ROI	$ROI \leq 0\%$: investimento não financeiramente viável
	$0\% < ROI \leq 20\%$: viável mas não atraente
	$ROI > 20\%$: viável e mais atraente

Quadro 07: Escala de atratividade proposta para análise de sensibilidade.

Fonte: próprio autor.

4.8.6. Análise de cenários

Além da análise de sensibilidade, devem ser calculados resultados financeiros para diferentes cenários. O exercício de planejar por cenários ajuda a identificar possíveis estratégias (VAN DER HEIJDEN, 2009). Em função do nível de significância dentre as diversas variáveis de um modelo econômico-financeiro do incinerador, pelo menos dois cenários devem ser considerados na análise envolvendo duas variáveis de maior efeito / impacto no resultado financeiro, das quais são indicadas a variação da taxa de juros do empréstimo do banco e o nível de custo de capital (BAUMANN, 2004).

A taxa de juros pode ser definida como o preço do uso do dinheiro ao longo de um determinado período de tempo. O primeiro cenário considerou uma taxa bancária de juros inferior à aplicada no cenário base para o caso de obtenção de linhas de financiamento junto aos bancos nacionais ou internacionais e no caso de adoção de algum tipo de incentivo público pela redução de imposto de importação. O segundo cenário considerou uma redução no custo de capital (CAPEX) para o caso de adoção de algum tipo de incentivo pelo poder público em termos de imposto de importação e/ou adoção de tecnologias de baixo custo frente às referências mundiais como é o caso da China (CHINA RESEARCH AND INTELLIGENCE, 2014). Ambos os cenários foram comparados ao cenário base e classificados e ranqueados de acordo com o desempenho dos indicadores estabelecidos de VPL, SBP, TIR e ROI.

4.8.7. Análise de risco

Os riscos constituem o conjunto de eventos capazes de comprometer o alcance dos objetivos de uma organização ou empreendimento (COSO, 2017; ISO, 2018) e

podem ser analisados a partir de uma faixa de variação associada a cada elemento do fluxo contábil, bem como de seus prazos (GITMAN, 2009; GITMAN e ZUTTER, 2017). A identificação dos riscos se baseia na oportunidade e na ocorrência do evento versus o impacto desse mesmo evento e através da abordagem de gerenciamento de riscos e monitoramento dos riscos (WALTERS, 2007; WALKER, 2013; AQLAN e ALI, 2014; CHOI *et al.*, 2016). Uma avaliação de risco deve ser realizada avaliando os riscos apresentados no quadro 8 (EC, 2014).

Categoria	Riscos
Regulatório	- Mudanças de requisitos ambientais, instrumentos econômicos e regulatórios
Demanda	- Geração de resíduos menor do que o previsto - Controle de fluxo de resíduos / entrega insuficiente
Projeto	- Escolha de tecnologia inadequada / ultrapassada - Estimativas de custo de projeto inadequadas
Administrativo	- Atraso na obtenção da(s) licença(s) de implantação - Atraso na obtenção da(s) licença(s) de operação - Atraso nas aprovações de serviços públicos
Aquisição do terreno	- Custos do terreno superior ao previsto
Compras	- Atrasos processuais
Construção	- Subdimensionamento do orçamento do custo do projeto - Atraso no cronograma de construção
Operacional	- Composição de resíduos diferente do previsto ou com variações significativas inesperadas - Custos de manutenção e reparo maiores do que o previsto - As saídas do processo não atendem às metas de balanço de massa - O não cumprimento dos limites de emissões produzidas pela instalação
Financeiro	- A tarifa por tonelada (<i>gate fee</i>) aumenta mais lentamente do que o previsto - Cobrança de tarifa por tonelada (taxa de portão) inferior ao previsto - Preço da energia (eletricidade e / ou térmica/vapor) inferior ao previsto
Social	- Efeito <i>Not in My Backyard</i> (NIMBY) - Oposição pública

Quadro 08: Principais riscos em projetos de incineradores de RSU com recuperação energética.

Fonte: adaptado EC (2014).

Para os projetos de incineradores pode-se utilizar como base a quantificação dos riscos sintetizados no quadro 8, buscando compreender o impacto, o grau de criticidade e identificando as causas e suas implicações.

4.9. Simulação de implantação de Incinerador de RSU com recuperação energética no município do Rio de Janeiro

Esta seção apresenta os resultados relacionados à simulação da avaliação técnico econômica da planta de tratamento térmico de RSU no Rio de Janeiro. Os principais parâmetros operacionais de projeto são mostrados na tabela 13.

Tabela 13: Principais parâmetros operacionais e financeiros do projeto do incinerador para o Rio de Janeiro.

#	Parâmetros operacionais	Unidade
1	Capacidade da planta	270.000 t/ano
2	Número de linhas	2
3	Vida útil da planta	30 anos
4	Período de construção	5 anos
5	Capacidade de processamento da planta por linha	135.000 t/ano
6	Disponibilidade da planta	90 %
7	Poder Calorífico Inferior (PCI) médio dos resíduos	9.832 kJ/kg
8	Eficiência da geração de eletricidade	30 %
9	Eficiência da geração de vapor	2,5 %
10	Capacidade de projeto da planta	17 MW
11	Potência total de saída	667 kWh/t
12	Consumo da planta (limite inferior da faixa de 10 à 15%)	67 kWh/t
13	Mão de obra total (própria + terceira)	50 funcionários
14	Eletricidade fornecida na rede	600 kWh/t

Nota: Os valores dos itens 8, 9, 10, 11, 12 e 14 foram calculados com base em uma combinação de informações obtidas nas visitas técnicas nos incineradores na Suíça e em Portugal, no referencial teórico e no guia de aplicação de resíduos em tecnologias energéticas na América Latina e no Caribe.

Fonte: Cucchiella *et al.*, (2012); ENERGINET (2012); Themelis *et al.* (2013); Maisiri *et al.*, (2015); Themelis e Bourtsalas (2019); próprio autor (visitas técnicas 2017 e 2018).

As premissas básicas financeiras de entrada para a simulação do incinerador para o Rio de Janeiro são mostradas na tabela 14.

Tabela 14: Principais parâmetros financeiros do projeto.

Premissas	Unidade
Capacidade da planta WtE	270.000 t/ano
Custo de capital (CAPEX) por tonelada	900 US\$/t
Custo de manutenção	3% do custo de capital
Preço de venda da electricidade	US\$ 0,134/kWh
Custo por tonelada tratada	US\$ 60/t
Preço de venda de metais ferrosos	US\$ 0,6/kg
Preço de venda de metais não ferrosos	US\$ 1,5/kg
Taxa de depreciação	5 %
Taxa de desconto (taxa de longo prazo)	8,25 %
Inflação	3,61 %
Taxa de juro	4,25 %
Imposto	Com base na tabela 12
Percentual Financiado por instituição financeira	80 % do custo de capital
Custo médio da força de trabalho (incluindo encargos)	US\$ 145.952,50/pessoa/ano
Despesas Gerais Administrativas (DGA)	50 % do custo total da mão-de-obra
Custo de produtos químicos	US\$ 4/t
Custo de limpeza de gases	US\$ 8/t

Nota: Os valores dos DGA, custo de produtos químicos e custo de limpeza de gás foram calculados com base em uma combinação de informações obtidas nas visitas técnicas nos incineradores na Suíça e em Portugal, no referencial teórico e no guia de aplicação de resíduos em tecnologias energéticas na América Latina e no Caribe.

Fonte: Cucchiella *et al.*, (2012); Themelis *et al.* (2013); Maisiri *et al.*, (2015); Themelis e Bourtsalas (2019); próprio autor (visitas técnicas 2017 e 2018).

O cenário base estabelecido considera os valores de investimentos, custos, despesas e receitas mais prováveis. A tabela 15 apresenta os resultados financeiros para o cenário base onde a TIR, VPL, SPB e o ROI foram utilizados como indicadores financeiros. O cenário base é estabelecido com os valores de investimentos, custos, despesas e receitas calculados utilizando como a tarifa por tonelada de 60 US\$ / t e preço da eletricidade de 0,134 US\$ / kWh.

Tabela 15: Resultados financeiros (cenário base).

Parâmetro	Resultados (cenário base)
TIR (%)	10,4
VPL (MM US\$)	19,2
SPB (%)	6
ROI (%)	8,7

Fonte: Próprio autor

O quadro 9 mostra uma escala de atratividade de investimento formulada com respectivo farol para permitir uma análise matricial dos resultados da análise de sensibilidade do VPL, TIR e ROI com as variáveis tarifa por tonelada (*gate fee*) e o preço da eletricidade.

Farol	Escala de atratividade
	VPL \leq 0: investimento inviável financeiramente
	$0 < \text{VPL} \leq \frac{1}{4}$ do custo de capital: viável e não atraente
	$\frac{1}{4} < \text{VPL} \leq \frac{1}{2}$ do custo de capital: viável e atraente
	$\frac{1}{2}$ do custo de capital $<$ VPL: viável e mais atraente
	TIR \leq 10%: investimento inviável financeiramente
	$10\% < \text{TIR} \leq 15\%$: viável e menos desejável
	TIR $>$ 15%: viável e mais desejável
	ROI \leq 0%: investimento inviável financeiramente
	$0\% < \text{ROI} \leq 20\%$: viável e menos desejável
	ROI $>$ 20%: viável e mais desejável

Quadro 09: Escala de atratividade proposta para análise de sensibilidade com farol.

Fonte: próprio autor.

As duas principais variáveis que influenciam fortemente o desempenho econômico do projeto foram identificadas como, o preço da eletricidade e a tarifa por tonelada (*gate fee*). Com isso, uma análise de sensibilidade foi realizada com essas duas principais variáveis de receita. Portanto, foram realizadas análises de sensibilidade do VPL, da TIR e do ROI para as variáveis tarifa por tonelada e preço da eletricidade. A tabela 16 mostra os resultados dos indicadores VPL, TIR e ROI da simulação, respectivamente:

Tabela 16: Resultados da análise de sensibilidade de VPL (a), TIR (b) e ROI (c).

VPL (milhão US\$)		Tarifa por tonelada (US\$ / t)									
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Preço da Eletricidade (US\$/kWh)	0,088	-152	-132	-112	-92	-73	-54	-35	-16	2	21
	0,098	-127	-107	-88	-68	-49	-30	-12	7	26	45
	0,109	-100	-80	-61	-42	-23	-4	14	33	52	71
	0,121	-69	-50	-32	-13	6	25	43	62	80	94
	0,134	-37	-18	0	<u>19,2</u>	38	57	75	90	104	118
	0,148	-5	14	33	51	70	86	100	114	128	142
	0,163	30	49	68	84	98	112	126	140	154	168
	0,179	69	85	99	113	127	141	155	169	183	197
	0,197	103	117	131	145	159	173	187	201	215	228
	0,216	138	152	166	180	194	208	222	236	249	263

NOTA: Resultado do cenário base em sublinhado.

(a)

TIR (%)		Tarifa por tonelada (US\$ / t)									
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Preço da Eletricidade (US\$/kWh)	0,088	-12,2	-7,7	-4,5	-2,0	0,4	2,4	4,5	6,5	8,5	10,6
	0,098	-6,8	-3,9	-1,4	0,9	3,0	5,0	7,0	9,0	11,1	13,2
	0,109	-2,8	-0,4	1,7	3,7	5,7	7,8	9,8	11,9	14,1	16,2
	0,121	0,8	2,8	4,8	6,8	8,9	11,0	13,1	15,2	17,3	18,7
	0,134	4,3	6,3	8,3	<u>10,4</u>	12,5	14,6	16,8	18,3	19,8	21,2
	0,148	7,7	9,8	11,9	14,0	16,1	17,9	19,4	20,8	22,2	23,6
	0,163	11,6	13,8	15,9	17,7	19,2	20,6	22,1	23,5	24,9	26,2
	0,179	16,1	17,8	19,3	20,8	22,2	23,6	25,0	26,3	27,6	28,9
	0,197	19,7	21,2	22,6	24,0	25,3	26,7	28,0	29,3	30,6	31,9
	0,216	23,3	24,7	26,0	27,4	28,7	30,0	31,2	32,5	33,7	34,9

NOTA: Resultado do cenário base em sublinhado.

(b)

Continua na próxima página

Continuação da tabela 16

ROI (%)		Tarifa por tonelada (US\$ / t)									
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Preço da Eletricidade (US\$/kWh)	0,088	-160	-140	-120	-101	-81	-63	-44	-26	-8	11
	0,098	-135	-115	-96	-76	-58	-40	-21	-3	15	34
	0,109	-108	-88	-69	-51	-33	-14	4	22	41	59
	0,121	-78	-59	-41	-23	-4	14	32	51	68	84
	0,134	-46	-28	-10	8,7	27	45	64	79	94	110
	0,148	-15	4	22	40	58	75	90	105	120	136
	0,163	20	38	56	73	88	104	119	134	149	164
	0,179	58	74	90	105	120	135	150	165	181	196
	0,197	94	109	124	139	155	170	185	200	215	230
	0,216	132	147	162	177	193	208	223	238	253	269

NOTA: Resultado do cenário base em sublinhado.

(c)

Fonte: próprio autor

Os resultados do cenário base apresentados na tabela 15 estão destacados em sublinhado na tabela 16 para a tarifa por tonelada de 60 US\$ por tonelada e preço da eletricidade de 0,134 US\$ por kWh. Os resultados da análise de sensibilidade do VPL mostram que a mudança nos valores dos preços da eletricidade afeta mais o desempenho financeiro do que a variação da tarifa por tonelada. Os resultados mostraram que no cenário base, a viabilidade financeira da planta de incineração de RSU com recuperação energética no Rio de Janeiro seria pouco atraente e dependeria de uma tarifa por tonelada (*gate fee*) de cerca de três vezes o valor médio praticado em aterros sanitários no Brasil. A análise do VPL foi realizada para diferentes preços de eletricidade e tarifa por tonelada, resultando em pontos para viabilidade financeira mínima de US\$ 0,134 por kWh para eletricidade e US\$ 60 por tonelada para *gate fee*, respectivamente.

A análise foi baseada em estimativas internacionais de custos relatadas e referenciais teóricos, que possuem um certo grau de incerteza e, por conta disso, adicionalmente foram criados dois cenários com variações nos resultados sobre o cenário base apresentado na tabela 15. Os resultados da análise financeira para os dois cenários foram calculados. O primeiro cenário (cenário 1) considera uma taxa de

empréstimo do banco de juros de 1%, ou seja, inferior ao do cenário base (4,25 %). O segundo cenário (cenário 2) considera uma redução do CAPEX de 20 % para o caso de adoção de algum tipo de incentivo fiscal pelo governo público ou a possibilidade de importar parte do equipamento da China. O CAPEX do projeto base foi de 900 US\$ / tonelada e neste segundo cenário reduziu para 765 US\$ / tonelada. A tabela 17 mostra os parâmetros dos cenários.

Tabela 17: Parâmetros dos cenários.

Parâmetro	Cenário Base	Cenário 1	Cenário 2
Taxa de juros (%)	4,25%	1%	4,25%
Custo de Capital (MM US\$)	248	248	199,4

Fonte: próprio autor

Ambos os cenários são comparados ao cenário base e os cenários foram classificados (ranqueados) de acordo com o desempenho em termos do ROI, VPL, TIR e SPB. O ROI, NPV, TIR e SPB para cada cenário são mostrados na tabela 18.

Tabela 18: Resultados e *ranking* dos cenários.

Ranking	Cenário	ROI (%)	VPL (MM US\$)	TIR (%)	SPB (ano)
3º	Base	8,7	19,2	10,4	6
2º	1	51,3	48,0	14,4	3,8
1º	2	66,2	62,7	17,1	3,5

Fonte: próprio autor

Pela análise financeira, conclui-se que o alto custo de capital (CAPEX) é a principal desvantagem na implementação de uma planta de incineração com recuperação energética e por isso o cenário 2, com redução de 20% do CAPEX, foi o primeiro no *ranking*. Mesmo sendo realizados simulações em 2 cenários distintos, outro aspecto que pode contribuir para a viabilidade financeira seria uma redução nas taxas de juros prevista no cenário 1 juntamente com a redução do CAPEX prevista no cenário 2.

4.10. Fatores críticos na implementação de incineradores de RSU em países em desenvolvimento e no Brasil

Com base nas análises e discussões apresentadas ao longo do estudo, o

quadro 10 apresenta um resumo dos principais fatores críticos e ações propostas relacionados a viabilidade financeira-econômica na implementação de incineradores de RSU com recuperação energética no Brasil e países em desenvolvimento.

Etapas da Portaria nº 557	Fatores críticos	Ações propostas
Estudo da Regionalização	Localização da Planta	Dada a existência de multivariáveis, aplicar modelo matemático de otimização logística usando software de programação linear e/ou sistema de informação geográfica
	Efeito <i>Not in My Backyard</i> (NIMBY)	Estabelecer plano de comunicação com todas as partes interessadas (autoridades, setor de resíduos, setor de energia e comunidade) para garantia na participação do processo desde a concepção do projeto
Estudo da Demanda	Concepção de conflito entre reciclagem e incineração	Aplicar a incineração em grandes centros urbanos desenvolvidos economicamente
		Dentro da PNRS a hierarquia estabelece a reciclagem como prioridade que deve anteceder as demais formas de tratamento e disposição final dos RSU. Contudo, além dos índices atuais de coleta seletiva no Brasil serem muito baixos, o que abre espaço para outras formas de tratamento, mesmo onde há valores elevados de reciclagem sempre existem rejeitos que poderão ser incinerados.
Estudo do valor dos Investimentos	Elevado CAPEX inicial	Estabelecer linhas específicas de financiamento com ofertas de taxas de juros diferenciadas nos bancos de desenvolvimento, para conseguirem atrair investidores privados e reduzir as despesas com o custo de capital
		Avanço tecnológicos na redução dos preços das tecnologias por parte dos fabricantes de equipamentos para plantas
		Incentivo fiscal com redução de imposto de importação
	Risco de adoção de tecnologias já superadas ou que não garantam níveis adequados de emissões	<p>Avaliar tecnicamente as tecnologias disponíveis (Europa, China, EUA,...) em termos de eficiência e garantia de controle de emissões</p> <p>Adotar boas prática (recomendações previstas na BAT)</p> <p>Estabelecer legislação de controle de emissões ambientais compatível com os padrões europeus.</p>

Continua na próxima página

Continuação do quadro 10

Estudo dos Custos e Despesas	Falta de experiência e mão de obra capacitada local	Estimular a desenvolvimento de tecnologia e engenharia locais
		Contratar especialistas internacionais a longo prazo e lançar programa de capacitação
	Variação e sazonalidade na heterogeneidade na alimentação de RSU	Realizar estudo detalhado da características dos resíduos para adoção de tecnologias apropriadas no projeto
		Estabelecer plano de contingência operacional para determinadas faixas de variação
Estudo da Receita	Volatilidade do preço da energia no mercado	Adotar contratos de fornecimento de energia a longo prazo. Uma demanda constante para a energia gerada pode consideravelmente compensar os custos da planta
	Receitas, por si só, podem não ser suficientes para viabilidade financeira	Avaliar subsídios públicos (concessões financeiras, empréstimos a juros baixos para plantas, redução de impostos)
		Avaliar a aplicação de: taxas diretas de resíduos de cidadãos; financiamento cruzado de serviços de RSU por meio de outras taxas ou impostos locais, reembolsos de impostos e aplicação de tarifas especiais de alimentação para eletricidade produzida a partir de fontes não convencionais, como resíduos
Avaliação econômico-social	Adequação do arcabouço legal	Elaborar/atualizar legislação específica para o licenciamento de instalações, bem como os padrões técnicos para orientar os projetos e definição dos critérios para a concessão de licenças ambientais.
		Regulamentar legislação nacional que estabeleça as condições para o controle de emissão de poluentes nas instalações tão restritiva quanto as praticadas pela UE
Estudo do Modelo de Negócio	Seleção de modelo de negócio adequado	Estimular política de participação pública adequada através das PPP's para atrair investidores privados e contribui para o sucesso da implementação no país.
Avaliação Financeira	Lacuna em termos de orientação para etapa 8 (avaliação financeira) da Portaria nº 557	Realizar as etapas complementares da análise financeira apresentadas no quadro 3
		Avaliar contratação de consultoria especializada para realização da análise financeira

Quadro 10: Fatores críticos e ações propostas.**Fonte:** próprio autor.

4.11. Situação atual da incineração de RSU com recuperação energética no Brasil

Atualmente não há incineradores de RSU em operação no Brasil, mas existem, quatro plantas de incineração com recuperação energética em fase de licenciamento,

todas na região Sudeste do país, sendo uma na Cidade do Rio de Janeiro localizada no bairro do Caju (capacidade estimada de 1.300 toneladas por dia e capacidade de geração informada de 745 MWh por dia), uma na cidade de São José dos Campos no estado de São Paulo (capacidade estimada de 1.000 toneladas por dia e capacidade de geração informada de 4,8 MW de eletricidade e 11,6 MW de vapor), a terceira na cidade de Barueri no Estado de São Paulo (capacidade esperada de 850 toneladas / dia e capacidade reportada de gerar 17,5 MW de eletricidade) e a quarta em Santos no Estado de São Paulo (capacidade estimada de 2.000 toneladas / dia e capacidade de geração de energia ainda não confirmada) (ENERGIA SPE, 2020). O projeto do incinerador de Santos vem tendo oposição pública por organizações ambientais, imprensa, entre outras entidades. Inclusive este projeto de incinerador ocasionou manifestos solicitando pautaço do Projeto de Lei Complementar (PLC) nº 55/2017, que tramita no Legislativo há três anos, que proíbe a instalação de uma usina incineradora de lixo em Santos.

O uso de incineradores em países em desenvolvimento, como o Brasil, pode contribuir para a gestão de RSU, particularmente nas grandes cidades onde haja maiores dificuldades para ampliação de novos aterros sanitários. Entretanto, sua implementação ainda apresenta desafios relacionados aos aspectos de regulamentação e normas técnicas, modelo de negócios, tecnologia, composição e poder calorífico dos resíduos, taxa de juros bancária de financiamento, nível de receita economicamente viável para o empreendimento, além dos aspectos sociais (UN ENVIRONMENT, 2019). Além do elevado CAPEX, a falta de capacidade técnica nos países, as questões culturais e a percepção de um eventual conflito entre reciclagem e incineração representam importantes obstáculos para a implantação da tecnologia (CUCCHIELLA *et al.*, 2012; GIZ, 2017; ONU MEDIO AMBIENTE, 2018). Com as restrições no investimento público, cada vez mais as PPP's vêm sendo instrumentos de viabilização de projetos de saneamento básico e os EVTE's estruturados são elementos primordiais para viabilização desses projetos. Os padrões de referência para a elaboração de EVTE's preconizados na Portaria nº 557, juntamente com os aspectos complementares propostos no artigo para avaliação financeira-econômica englobam os principais aspectos a serem avaliados para um projeto de implantação do incinerador. A inclusão de incineradores com recuperação energética no sistema integrado de gerenciamento de RSU, particularmente nos países em desenvolvimento, precisa ser incorporada a um sistema integrado de gerenciamento

de RSU, considerando-se as possibilidades de sua adaptação às condições específicas locais, tendo em conta que a experiência tem mostrado que os incineradores de RSU com recuperação energética podem ser uma má escolha econômica para a maioria deles devido aos altos custos de capital e de operação (YAN *et al.*, 2020) se os EVTE's não forem bem estruturados. Para se reduzir os riscos de projetos que fracassem, eles devem ser antecidos por uma avaliação cuidadosa dos fatores críticos que dificultam a adoção da tecnologia de incineração, direcionando-se esforços e ações estruturadas para que se estabeleçam as condições necessárias para uma operação adequada e sustentável.

5. DISCUSSÕES:

A introdução de tecnologias como a incineração de RSU com recuperação energética é frequentemente comprometida por obstáculos comuns, como a falta de sistemas tarifários para financiar investimentos e custos operacionais, pouca aplicação das leis ambientais e pessoal qualificado limitado para operar os sistemas instalados de maneira eficiente e eficaz. Se tais aspectos não forem levados em consideração existe o risco de o projeto falhar à custa do município e do ambiente local (GIZ, 2017).

O desenvolvimento de uma instalação de incineração de RSU com recuperação energética moderna envolve muitos desafios, que, principalmente em países em desenvolvimento, requerem maior cuidado para evitar o desperdício de recursos em projetos malsucedidos (MESSENGER, 2019). A implantação de plantas de incineração de RSU com recuperação energética em países em desenvolvimento apresenta desafios como as dificuldades de adaptação às condições locais e aceitação pública, e o risco de falha no desperdício de recursos importantes (UN HABITAT, 2009). Entre os diversos desafios existentes para adoção da alternativa de tratamento térmico de RSU com recuperação energética através de incineradores nos países em desenvolvimento, que inclui o Brasil, pode-se listar:

- A mentalidade atual de uma parte dos países em desenvolvimento de dispor os resíduos em lixões a céu aberto ou aterros controlados, não havendo consciência pública suficiente sobre os sistemas de tratamento de resíduos com aproveitamento energético como uma opção de tratamento viável (COELHO, 2020).

- A ausência de regulamentos e padrões técnicos para orientar e apoiar oportunidade de desenvolvimento do projeto e também da operação. Além de um sistema abrangente de regulamentos, devem ser estabelecidas diretrizes técnicas e padrões de emissão considerando as tecnologias modernas de tratamento térmico de RSU com recuperação energética disponíveis (YAN *et al.*, 2020).
- Os incineradores requerem grandes valores de investimento de capital e precisam ser suportados por um planejamento financeiro de longo prazo e, principalmente, respaldados por recursos suficientes para garantir a sua operação e manutenção ao longo deste prazo. Para isso, é importante que nos países em desenvolvimento, fundos de investimento para aporte inicial deste capital estejam disponíveis (GIZ, 2017).
- Além do elevado investimento inicial de capital, que exigem uma capacidade mínima para obter a viabilidade econômica, os custos de operação, a falta de capacidade técnica, as questões culturais e uma concepção de conflito entre reciclagem e uso de energia, podem ser listados entre as questões para não uso da incineração de RSU com recuperação energética em vários países. (CUCCHIELLA *et al.*, 2012; GIZ, 2017).
- Boa parte dos países em desenvolvimento não possuem empresas fornecedoras em operação na região que possam fabricar equipamentos para sistemas de tratamento térmico com recuperação energética, que ofereçam alternativas para contratos de Engenharia, Gestão de Compras e Construção (EPC - *Engineering Procurement Construction*) (COELHO, 2020).
- Nos países em desenvolvimento, os baixos valores do poder calorífico inferior (PCI) e o alto teor de umidade dos resíduos permanecem como um dos principais desafios para a viabilidade técnica de incineradores de RSU com recuperação energética pois o PCI deve ser em média pelo menos 7 MJ / kg, e não cair/manter abaixo de 6 MJ / kg (UN ENVIRONMENT, 2019).

Um passo importante antes da implementação de uma primeira planta de incineração de RSU no Brasil deve ser a revisão das políticas de controle de emissões de forma a fomentar o uso de equipamentos eficientes de controle de poluição. Apesar dos elevados custos envolvidos na implementação de um incinerador de RSU com recuperação energética, há potencial de receita com o uso dessa tecnologia.

A energia produzida em uma planta, térmica ou elétrica, pode ser importante para o suprimento local como energia complementar e renovável. No caso da simulação para a cidade do Rio de Janeiro, os ganhos com a venda da eletricidade e da energia térmica geradas pela planta mostraram-se importantes para a viabilidade econômica, além claro, das receitas da tarifa por tonelada. A volatilidade do preço da energia elétrica no mercado brasileiro é consequência do modelo de comercialização de energia que ocorrer através de leilões. Essa volatilidade impacta diretamente a projeção de receitas para a viabilidade econômica e pode ser mitigada por meio da adoção de contratos de fornecimento de energia a longo prazo.

A partir de 2004, com a edição da Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, e do Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004, que regulamentou a comercialização de energia elétrica e o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, ficou estabelecido que as concessionárias, as permissionárias, e as autorizadas do serviço público de distribuição de energia do SIN (Sistema Interligado Nacional) deveriam garantir, por meio de licitação, na modalidade de leilão, o atendimento à totalidade de seu mercado no ACR (Ambiente de Contratação Regulada) (BRASIL, 2004a; BRASIL, 2004c). Com vistas à execução dessas contratações, a legislação estabeleceu que os leilões seriam regulados e realizados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), observado o disposto no art. 3º da Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, com a redação dada pela Lei nº 10.848/2004 (BRASIL, 2004a). Tal delegação incluiu a faculdade da ANEEL promovê-los diretamente ou por intermédio da CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica). Os Leilões do ACR possuem como objetivo: (a) contratar energia pelo menor preço possível (modicidade tarifária); (b) atrair investidores para construção de novas usinas com vistas à expansão da geração; e (c) reter a geração existente.

Os resultados da simulação, bem como as restrições observadas para o projeto, destacam alguns aspectos importantes sobre a implementação desse tipo de tecnologia no Brasil e em outros países em desenvolvimento, respeitando as especificidades locais, listados a seguir.

Uma estrutura legislativa completa e detalhada é um pré-requisito para a introdução da incineração com recuperação energética nos países em desenvolvimento (UN ENVIRONMENT, 2019). O conceito de hierarquia de resíduos na política de resíduos do Brasil deve considerar a alternativa do tratamento térmico. Além disso, as diretrizes políticas devem ser regulamentadas para garantir um alto nível de proteção ao meio ambiente e à saúde humana, além de enfatizar a relevância da minimização da geração de resíduos (3R). Uma legislação específica para o licenciamento de instalações de incineração precisa ser atualizada, bem como os padrões técnicos para orientar os projetos de incineração com recuperação energética e para conceder a concessão de licenças ambientais.

Além disso, deve ser regulamentada uma legislação nacional que estabeleça as condições para o controle de emissão de poluentes nas instalações de processamento térmico de RSU, tão restritiva quanto as recomendadas pela União Europeia. A legislação do tratamento térmico de RSU deve cumprir os limites de emissões reconhecidos internacionalmente para evitar danos ao meio ambiente e à saúde pública (GIZ, 2017). Como esses limites geralmente não são estabelecidos nos países em desenvolvimento, eles devem primeiro ser desenvolvidos de acordo com os padrões internacionalmente reconhecidos, como a Diretiva de Emissões Industriais da União Europeia, e permitir ampla capacidade e adequado monitoramento (UN ENVIRONMENT, 2019).

Sobre o modelo de negócios, uma vantagem das PPP's é que ela viabiliza financeiramente diversos projetos, pois os riscos de conclusão e saída do projeto são compartilhados com o governo e o operador privado (UN ENVIRONMENT, 2019). Uma política de participação pública adequada (baseada em um modelo de negócios adequado) atrai investidores e contribui para o sucesso da implementação no país. A importância da implementação de PPP's surgiu a partir do momento em que foi constatada a ineficiência e morosidade do Estado em fornecer alguns serviços. Por meio das PPP's, o Estado transfere um serviço para a iniciativa privada que é mais ágil em executar as obras e serviços necessários. A vantagem é que, utilizando essas parcerias, o Estado continua atuando de acordo com o disposto na Lei nº 11.079/04, que define que a PPP como contrato de concessão administrativa na modalidade patrocinada ou administrativa (BRASIL, 2004b; CARVALHO FILHO, 2016). De acordo com a nova estrutura de saneamento básico, os municípios e os distritos federais são responsáveis pelos serviços públicos de saneamento básico no nível local, mas os

responsáveis pela prestação do serviço de saneamento básico podem permitir a exploração por meio de concessões ao setor privado. É importante ressaltar que apenas 15 % da concessão e projetos de PPP's lançados no Brasil terminam na assinatura dos contratos (FIRJAN, 2019).

A principal tecnologia adotada nas câmaras de combustão para tratamento térmico de RSU são as grelhas móveis, e muitas empresas fornecem essa tecnologia comprovada no mercado internacional, mas não ainda no mercado nacional. Além disso, não há empresas no Brasil que produzam refratários compatíveis com câmaras de combustão de incineradores. Um processo de transferência de tecnologia para produção de refratários, por parte de uma empresa suíça para outra localizada em São Paulo, foi realizado, mas ainda não há linha de produção instalada.

Segundo Yan *et al.* (2020), o controle e tratamento de cinzas volantes é um grande desafio em termos de esforços para desenvolver uma rede sustentável de plantas de incineração com recuperação energética. Nas relações de transferência de tecnologia entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, é essencial que a experiência na superação de problemas possa ser aproveitada e, em particular, no entendimento da importância da adoção da melhor tecnologia do ponto de vista do desenvolvimento sustentável, reduzindo o risco de adoção de tecnologias já superadas (DORN *et al.*, 2012). Dado esta situação atual, o Brasil precisa desenvolver incentivos fiscais para importações, como a redução na alíquota fornecida do Imposto de Importação. É importante também considerar formas de treinamento em operação e manutenção para capacitar os recursos humanos antes da construção e após o início da operação. O maior desafio é a necessidade de sinais políticos claros e constantes, pois é a base para qualquer avanço no gerenciamento de resíduos (RAGOSSNIG e VUJIÉ, 2015).

Devido aos altos custos de investimento, plantas térmicas de RSU com apenas padrões técnicos básicos estão surgindo nos países em desenvolvimento e gerando questionamentos sobre a qualidade do incinerador e sua operação (GIZ, 2017). No Brasil, observa-se que as taxas de juros de financiamento praticadas são muito altas em comparação com as praticadas no mercado internacional. O banco governamental de desenvolvimento (no caso do Brasil, o BNDES), por meio de linhas de desenvolvimento próprias, deve oferecer taxas de juros de financiamento diferenciadas para atrair investidores e contribuir para a implementação bem-sucedida no país. Segundo Ragossnig e Vujié (2015), o custo é um grande desafio para a

indústria de resíduos na implementação de soluções sustentáveis de gerenciamento de resíduos nos países em desenvolvimento, mesmo que as experiências de um país não possam ser exportadas diretamente para outro, é muito importante aprender as razões para soluções de gestão de resíduos que funcionem ou não, a fim de evitar erros e gastar mais dinheiro do que o necessário.

Em relação a tarifa por tonelada, como a taxa mínima para a viabilidade financeira do incinerador é superior à taxa mínima para aterros em operação no Brasil, tipos de subsídios ou medidas regulatórias também seriam necessários para garantir que a capacidade operacional seja totalmente utilizada.

Muitos estudos apresentam fortes críticas negativas ao desenvolvimento de incineradores de RSU com recuperação energética, com foco em soluções alternativas (CHALIKI *et al.*, 2016). As questões básicas definidas pela opinião oposta estão concentradas nas emissões de substâncias tóxicas e redução das taxas de reciclagem onde a incineração é aplicada, bem como ao alto capital inicial para construção e operação em comparação com outras usinas de combustíveis fósseis estabelecidas (GAIA, 2013; SORA, 2013).

De acordo com Psomopoulos *et al.* (2009), as emissões tóxicas dos incineradores foram fortemente reduzidas através da aplicação de uma regulamentação muito rígida que é aplicada a essas instalações, forçando-as a se tornarem as instalações industriais com a menor emissão de equivalente tóxico em comparação com todos os outros processos industriais (PSOMOPOULOS *et al.*, 2013; PSOMOPOULOS *et al.*, 2009). De acordo com ISWA (2012), a UE e os EUA têm adotado níveis de emissão muito rígidos para essas emissões e, ao mesmo tempo, as instalações emitem volumes ainda menores do que o máximo permitido, e com monitoramento contínuo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS:

A implementação incineração de RSU com recuperação energética nos países em desenvolvimento apresenta diversos desafios, como regulamentação e normas técnicas, seleção de modelo de negócios, nível e disponibilidade de tecnologia, composição dos resíduos da região, disponibilidade da taxa de juros bancária de financiamento e estabelecimento de incentivos para garantir níveis de receita economicamente viável para o negócio, além claro dos do tratamento dos aspectos sociais.

O uso de incineradores em países em desenvolvimento, como o Brasil, pode contribuir para a gestão de RSU, particularmente nas grandes cidades onde haja maiores dificuldades para ampliação do uso de aterros sanitários. Entretanto, sua implementação ainda apresenta desafios a serem enfrentados como: a superação da rejeição das comunidades a partir da determinação de todas as externalidades positivas e negativas e, de comum acordo, o estabelecimento de medidas mitigadoras e compensatórias, a confirmação do PCI dos resíduos incinerados ao longo da vida útil do incinerador, alinhada com as estratégias do Plano de Gestão Integrada de Resíduos da área atendida e as possíveis variações das características destes resíduos.

Considerando se tratar de um empreendimento de CAPEX elevado, aos órgãos de controle cabe assegurar que a tecnologia do projeto seja de última geração, evitando riscos de uma planta ultrapassada, que não atenda a padrões rígidos operacionais e de controle de emissões de poluentes, colocando em risco o meio ambiente e a saúde pública. Além disso, com as restrições no investimento público, cada vez mais as PPP's vêm sendo instrumentos de viabilização de projetos de saneamento básico e os EVTE's estruturados são elementos primordiais para viabilização desses projetos.

Os padrões de referência para a elaboração de EVTE's preconizados na Portaria nº 557, juntamente com os itens complementares propostos no artigo para etapa de avaliação financeira, englobam os principais aspectos a serem avaliados para um projeto de implantação de um incinerador. Adicionalmente, para se reduzir os riscos de projetos malsucedidos, é importante avaliar a especificidade da região e realizar uma avaliação cuidadosa dos fatores críticos que dificultam a adoção da tecnologia de incineração, de forma a direcionar os esforços nas ações, conforme sintetizado no quadro 10, para que se estabeleçam as condições necessárias para uma operação adequada tecnicamente e sustentável financeiramente.

A análise do VPL, além da TIR e ROI, foi realizada para diferentes preços de eletricidade e tarifa por tonelada na análise de sensibilidade, resultando em pontos para viabilidade financeira mínima de US\$ 0,134 por kWh para eletricidade e US\$ 60 por tonelada para *gate fee*, respectivamente. Uma avaliação dos resultados da análise de sensibilidade do VPL mostra que a mudança nos valores dos preços da eletricidade (US\$/kWh) afeta o desempenho financeiro superior à variação da tarifa por tonelada (US\$/t). Os resultados do estudo revelaram que, nas condições previstas no cenário

base, a viabilidade da planta de incineração de RSU com recuperação energética no Rio de Janeiro seria pouco atraente financeiramente e dependeria de uma tarifa por tonelada (*gate fee*) de cerca de três vezes o valor médio praticado em aterros sanitários no país. A redução no custo de capital da ordem de 20% adotada no cenário 2, poderia reduzir um pouco o valor da tarifa por tonelada (*gate fee*), mas ainda assim seria muito alta, além de uma receita de eletricidade garantida com contratos de longo prazo, ao invés de ser comercializada através da modalidade atual de leilões. Pela análise financeira conclui-se que o alto CAPEX é a principal desvantagem na implementação de uma planta de incineração com recuperação energética, e a maior receita de uma planta de incineração com recuperação energética é a venda de eletricidade em comparação com outras receitas (tarifa por tonelada e vendas de metais).

Uma importante alavanca para viabilidade da planta de incineração com recuperação energética são os instrumentos de financiamento para energia por parte do governo. Os governos financiam formas de suprimento de energia geralmente fornecendo subsídios, em termos de regulamentação e transferências diretas, tratamentos tributários preferenciais, restrições comerciais e/ou financiamento público direto. Além disso, uma atenção contínua à disponibilidade restrita de fornecedores locais especializados deve ser considerada um risco deste tipo de projeto, além também da possibilidade de o projeto obter financiamento com taxas de juros menores do que as disponíveis no banco nacional atualmente. Por fim, é importante observar que é necessária uma revisão das regulamentações para controle de poluição do ar no Brasil, a fim de fomentar o uso de equipamentos eficientes no controle de poluição, de acordo com as melhores técnicas disponíveis.

7. SUGESTÕES:

O modelo proposto servirá como uma base para orientar a realização de estudos de viabilidade técnico econômico-financeiro de implementação de plantas de incineração com recuperação energética, em especial em países em desenvolvimento, por não possuírem essa tecnologia aplicada na gestão de RSU. O modelo proposto auxilia para aumentar o sucesso do empreendimento, considerando aspectos técnicos, operacionais, sociais e, em especial, econômico-financeiros. Atualmente não existem incineradores com recuperação energética em operação no Brasil, mas existem pelo menos quatro instalações de incineração de RSU na fase de

licenciamento ambiental nas duas principais regiões metropolitanas, São Paulo e Rio de Janeiro. Como sugestão para extensão do estudo, destacamos: (a) o levantamento dos dados dessas quatro instalações de incineração na fase de licenciamento ambiental para *input* e análise do modelo e; com vistas aos próximos passos para implantação de uma planta de tratamento térmico de RSU, sugere-se (b) elaborar um artigo que trate mais detalhadamente das ações para viabilização do projeto em formato de Plano Diretor de Implementação (PDI) e, além disso, recomenda-se também a realização de um estudo comparativo, com os mesmos indicadores de viabilidade econômica desta pesquisa, entre aterros e incineradores.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA:

ABRANTES, J.M.C.N. Avaliação técnica e económica da aplicação de sistemas Waste to Energy no tratamento de resíduos urbanos em aglomerados de média e pequena dimensão. Dissertação apresentada ao programa de Mestrado em Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – *NBR ISO 31.010: Gestão de Riscos - Diretrizes*. Rio de Janeiro, 2018.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. 2018. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 18 nov. 2019.

ALPEREN, T.; EMRAH, Ö.; AYŞEGÜL, A. Waste to energy technologies for municipal solid waste management in Gaziantep. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v., 54, p. 809-815, fev. 2016.

ALQATTAN, N.; ACHEAMPONG, M.; JAWWARD, F.; ERTEM, F.; VIJAYAKUMAR, N.; BELLO, T. Reviewing the potential of Waste-to-Energy (WTE) technologies for Sustainable Development Goal (SDG) number seven and eleven. *Renewable Energy Focus*, v. 27, p. 97-110, dez. 2018.

AQLAN, F.; ALI, E. M. Integrating lean principles and fuzzy bow-tie analysis for risk assessment in chemical industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 29, p. 39-48, 2014.

ASIAN DEVELOPMENT BANK. Guidelines for the economic analysis of projects. Mandaluyong City, Philippines: Asian Development Bank, 2017. DOI: 10.22617/TIM178607-2.

ASSAF, A. *Finanças corporativas e valor*. 7 ed. São Paulo: Atlas, 2003.

BANKIEWICZ, D.; VAINIKKA, P.; LINDBERG, D.; FRANTSI, A.; SILVENNOINEN, J.; YRJAS, P.; HUPA, M. High Temperature Corrosion of Boiler Waterwalls Induced by Chlorides and Bromides Part 2. Lab-Scale Corrosion Tests and Thermodynamic Eq. Modeling of Ash and Gaseous Species. v. 94, p. 240–250, 2012.

BARROS JUNIOR, C.; TAVARES, C. R. G.; BARROS, S. T. D. Modelo de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos – estudo para o município de Maringá, Estado do Paraná. *Revista Acta Scientiarum*. Technology Maringá, v. 25, n. 1, p. 17-25, abr. 2003.

BAUMANN, R.; CANUTO, O.; GONÇALVES, R. *Economia Internacional*. São Paulo: Campus, 2004.

BESCHERER, F. Establisher Life Cycle Concept in the Business Environment, Helsinki University of Technology, 2005.

BHADA, P.; THEMELIS, N.J. *Potential for the first wte facility in Mumbai (Bombay) India*. NAWTEC16 16th Annual North American Waste-to-Energy Conference in May 19-21, Philadelphia, Pennsylvania, 2008. DOI: 10.1115/NAWTEC16-1930.

BNDES - National Bank for Economic and Social Development. Analysis of Various Treatment Technologies and Final Disposal of Solid Waste in Brazil, Europe, USA and Japan. Cientific Report nº 02/2010, 2014.

BONOMI, C.; MALVESSI, O. *Project finance no Brazil: fundamentos e estudos de casos*. 2 ed. São Paulo: Atlas, 2008.

BOGALE, W., VIGANÒA, F. A preliminary comparative performance evaluation of highly efficient Waste-to-Energy plants. *Energy Procedia*, v. 45, p. 1315-1324, 2014.

BRASIL. Lei nº 6.404, de 15 de dezembro de 1976. Dispõe sobre as Sociedades por Ações. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 15 dez. 1976.

BRASIL. Constituição Federal. *Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF: Senado, 1988.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 8.666, de 21 de junho de 1993. Regulamenta o art. 37, inciso XXI, da Constituição Federal, institui normas para licitações e contratos da Administração Pública e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, Seção 1, p. 8281, 22 jun. 1993.

BRASIL. Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF. - Seção 1 – 14, p. 1917, fev. 1995.

BRASIL. Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. *Diário oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 27 dez. 1996.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2000. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, Seção 1, p. 92-95. 20 nov. 2002a.

BRASIL. Decreto nº 4.542, de 26 de dezembro de 2002. Aprova a tabela de incidência do imposto sobre produtos industrializados - TIPI. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 27 dez. 2002b.

BRASIL. Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as leis 5.655/71, 8.631/93, 9.074/95, 9.427/96, 9.478/97, 9.646/98, 9.991/00, 10/438/02, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, Seção 1, p. 2, 16 mar. 2004a.

BRASIL. Lei nº 11.079, de 30 de dezembro de 2004. Institui normas gerais para licitação e contratação de parceria público-privada no âmbito da administração pública. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, Seção 1, p. 17, 31 dez. 2004b.

BRASIL. Lei nº 5.163, de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 31 jul. 2004c.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei n 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 05 jan. 2007.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS); altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 23 dez. 2010.

BRASIL. Lei nº 12.462, de 04 de agosto de 2011. Institui o Regime Diferenciado de Contratações Públicas - RDC, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF. Seção 1 - Edição Extra, 04 ago. 2011.

BRASIL. Portaria nº 557, de 11 de novembro de 2016. Institui normas de referência para a elaboração de estudos de viabilidade técnica e econômico financeira (EVTE). *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, nº 218, Seção 1, p. 129, 14 nov. 2016.

BRASIL. Portaria nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, Seção 1, p. 1, 16 jul. 2020.

BRAZIL, H.G. *Avaliação moderna de investimento*. 1 ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2008.

BRUNNER, P.H.; RECHBERGER, H. Waste to energy key Element for Sustainable Waste Management. *Waste Management*, v. 37, p. 3-12, mar. 2015.

CAMPOS, H.K.T. Renda e evolução da geração per capita de resíduos sólidos no Brasil. *Engenharia Sanitária Ambiental*, v.17, n. 2, abr/jun. 2012.

CÂNDIDO, L.; KINDLEIN, W.; DEMORI, R.; CARLI, L.; MAULER, R.; OLIVEIRA, R. The recycling of materials as a design project tool. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, p. 1438–45, set. 2011.

CARVALHO FILHO, J. S. *Manual de Direito Administrativo*. 30 ed. São Paulo: Atlas, 2016.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Inventário Anual de Resíduos Sólidos Domiciliares 2018*. São Paulo. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 09 set. 2019.

CEWEP - Confederation of European Waste-to-Energy Plants. *CEWEP Energy Efficiency Report (Status 2007-2010)*, 2011. Disponível em: <<http://www.cewep.eu/information/energyclimate/cewepenergyefficiencyreports/index.html>>. Acesso em:12 mar. 2020.

CEWEP - Confederation of European Waste-to-Energy Plants. *CEWEP Energy Report III, 2017*. Disponível em: <<https://www.cewep.eu/>> . Acesso em: 12 mar. 2020.

CHALIKI, P.; PSOMOPOULOS, C. S.; THEMELIS, N. J. WTE plants installed in European cities: a review of success stories. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, v. 27, p.606–620, 2016.

CHEN, Y.C.; WANG, C.T. Municipal solid waste (MSW) incineration's potential contribution to electricity production and economic revenue in Taiwan. *Journal of Taiwan Energy*, v. 4, n. 1, p. 93-106, mar. 2017.

CHI, Y. *Waste-to-Energy in China*. Expert Group Meeting on Sustainable Application of Waste-to-Energy in Asian Region. Busan, Korea. p 22-23, fev. 2017.

CHINA RESEARCH AND INTELLIGENCE. Research Report on China's Dairy Industry, 2011-2012, 2014. Disponível em: <<http://www.cri-report.com/>>. Acesso em: 13 jan 2019.

CHIRICO, V. *Municipal Waste Treatment Plants Zurich*: Swiss Reinsurance Company, 1996.

CHOI, Y.; YE, X.; ZHAO, L.; LUO, A.C. Optimizing enterprise risk management: a literature review and critical analysis of the work of Wu and Olson. *Annals of Operations Research*, v. 237, p. 281-300, 2016.

COELHO, S.T. Existing Barriers for WtE in Developing Countries and Policy Recommendations. In: *Municipal Solid Waste Energy Conversion in Emerging*

Countries: Technologies, Best Practices, Challenges and Policy [S.l: s.n.], 2020. DOI: 10.1016/B978-0-12-813419-1.00007-3.

COHEN, B. Modelling approaches for greenhouse gas emissions projections from the waste sector. *Sustainable Production and Consumption*, v. 10, p. 15-20, abr. 2017.

COSO - COMMITTEE OF SPONSORING ORGANIZATIONS OF THE TREADWAY COMMISSION. *Gerenciamento de Riscos Corporativos integrado com a Estratégia e o Desempenho*, 2017.

COMLURB - COMPANHIA MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA. *Caracterização dos Resíduos Sólidos Domiciliares da Cidade do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: Relatório Técnico, 2017. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/web/smac/>>. Acesso em: 13 jan 2019.

CONSONNI, S.; GIUGLIANO, M.; MASSARUTTO, A.; RAGAZZI, M.; SACCANI, C. Material and energy recovery in integrated waste management systems: project overview and main results. *Waste Management*, v. 31, p. 2057-2065, set/out. 2011.

CONTRERA, J. M. A. D.; ALMEIDA, F. S.; SANTOS, A. C.; ANDRADE, T. A. G. Análise da Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos nos Municípios do Estado do Rio de Janeiro e o Papel dos Aterros Sanitários na Diminuição dos Impactos Ambientais. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*. vol. 41. p. 178-185. mar, 2018.

COSSU, R., MASI, S., 2013. Re-thinking incentives and penalties: Economic aspects of waste management in Italy. *Waste Management*, v. 33, p. 2541-2547, nov. 2013.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; GASTALDI, M. Municipal waste management and energy recovery in an Italian region. *Waste Management & Research*, v. 30, p.1290-1298, dez. 2012.

DORN, T.; NELLES, M.; FLAMMES, S.; JINMING, C. Waste disposal technology transfer matching requirement clusters for waste disposal facilities in China. *Waste Management*, v. 32, p. 2177-2184, nov. 2012.

DYKGRAAF, E.; VOLLEBERGH, H. Burn or Bury? A social cost comparison of final waste disposal methods. *Ecological Economics*. v. 50, p. 233-247, 2004.

EC – EUROPEAN COMMISSION. Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020. European Commission Directorate-General for Regional and Urban policy, 2014.

ECOPROG. Waste-to-Energy Monitor 16/2020. Ecoprog Krefelder Straße Cologne, Germany, 2020. Disponível em: <www.ecoprog.de>. Acesso em: 16 ago. 2020.

EEA - European Environmental Agency Europe's Environment. The 4th Assessment, Office for Official Publications of the European Communities, Copenhagen. 2007. Disponível em: <http://www.eea.europa.eu/publications/state_of_environment_report_2007_1/full-report-europes-environment-the>. Acesso em: 26 out. 2020.

EFSTRATIOS, K.; ATHANASIOS, B.; MANOLIS, K.; NICKOLAS, J.T. K. AVRAAM (Ed.), *Waste to Energy*, Springer, London, p. 219-235, 2012.

ENERGIA SPE. Estudo de Análise de Risco: EIV URE Valoriza. AMrisk Consultoria e Engenharia de Risco. SGW Services Engenharia Ambiental Ltda. Santos/SP, abr. 2020 Disponível em: <https://www.santos.sp.gov.br/static/files_www/files/portal_files/site/ear_valoriza_1.pdf>. Acesso out. 2020.

ENERGINET. *Technology Data for Energy Plants: Generation of Electricity and District Heating, Energy Storage and Energy Carrier Generation and Conversion*. Energinet Styrelsen, Danish Energy Agency, Energinet.dk, 2012.

ENERGY MANAGEMENT. *Handbook-module 16*. North-West University, Potchefstroom, p. 1-11, 2014.

ENVIRONMENTAL RESEARCH & EDUCATION FOUNDATION. *Analysis of MSW Landfill Tipping Fees*. Environmental Research & Education Foundation, 2017. Disponível em: <<https://erefdn.org/product/analysis-msw-landfill-tipping-fees-2/>>. Acesso em: 09 nov. 2019.

EPE – EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS. *Avaliação Preliminar do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande*. Nota Técnica DEN 06/08, Ministério de Minas e Energia, nov. 2008.

EPE – EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS. *Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2011-2020)*. Nota Técnica DEA 03/11. Brasília: EPE, 2011.

EREF - ENVIRONMENTAL RESEARCH & EDUCATION FOUNDATION. *Analysis of MSW Landfill Tipping Fees*. Environmental Research & Education Foundation, 2017. Disponível em: <<https://erefdn.org/>>. Acesso em: 09 nov 2019.

ETC/SCP: Municipal solid waste management capacities in Europe. ETC/SCP Working Paper nº 8, 2014.

EHRHARDT, M.; BRIGHAM, E. *Financial Management*, 13th ed. Mc Graw-Hill. 2010.

EUROPEAN COMMISSION. *Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020*. European Commission Directorate-General for regional and urban policy, 2014. DOI: 10.2776/97516.

EUROSTAT. *Statistics in Focus*, 2016. Environmental data centre on waste. Disponível em: <<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/>>. Acesso em: 16 ago. 2017.

EUROSTAT. *Energy, transport and environment statistics*. Statistical Book edition 2019. Environmental data centre on waste. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/10165279/KS-DK-19-001-EN-N.pdf/76651a29-b817-eed4-f9f2-92bf692e1ed9>>. Acesso em: 27 jun. 2020.

FAS – FINANCIAL ACCOUNTING STANDARDS BOARD. Accounting Standards: Current Text, Vol. 1. John Wiley: New York, 2002.

FEITOSA, A., BARDEN, J., KONRAD, O. (2018) Gravimetric Analysis in Urban Solid Waste Management: A Systematic Review. *Environmental Observatory Bulletin Alberto Ribeiro Lamego*, v. 12, p. 131-146, 2018.

FILHO, A., SOUZA, J.C.F., GONÇALVES, C.P., CURY, M.Q. *Finanças Corporativa*. 12 ed. Rio de Janeiro: FGV, 2016.

FILHO, C.S.; SOLER, F. *Gestão de resíduos no Marco do Saneamento*. Valor Econômico, 06 de agosto de 2020. Legislação. Disponível em: <<https://valor.globo.com/legislacao/noticia/2020/08/06/gestao-de-residuos-no-marco-do-saneamento.ghtml>>. Acesso em: 24 set. 2020.

FIRJAN. *Oportunidades de concessões e PPP (parcerias público-privadas) nos estados e municípios do Rio de Janeiro*. Nota Técnica. Mai. 2019. Disponível em: <https://www.firjan.com.br/publicacoes/>. Acesso em: 02 mai. 2020.

FORTEZA, R.; FAR, M.; SEGUI, C.; CERDA, V. Characterization of bottom ash in municipal solid waste incinerators for its use in road base. *Waste Management*, v. 24, p. 899–909, 2004.

FRIEGE, H.; FENDEL, A. Competition of different methods for recovering energy from waste. *Waste Management & Research* v. 29, p. 30–38, 2011.

FRUERGAARD, T., ASTRUP, T. Optimal utilization of waste-to-energy in an LCA perspective. *Waste Management* v. 31, p. 572-582, 2011.

GAIA - Global Alliance for Incinerator Alternatives. Waste Incinerators: Bad News for Recycling and Waste Reduction. 2013. Disponível em: <http://www.no-burn.org/downloads/Bad%20News%20for%20Recycling%20Final.pdf>. Acesso em: 24 set. 2020.

GANDOLLA, M.; QUITIAN, M.G. *Criterios de planificación de un vertedero de residuos moderno*. II ATEGRUS/ISWA Beacon Conference on Hazardous Wastes, 2005.

GANDOLLA, M.; QUITIAN, M.G.; ROBLEDO, E. *Criterios de planificación de un moderno vertedero basado sobre el análisis del metabolismo urbano*. 9º Congreso Internacional Disposición Final de Residuos y Perspectivas Ambientales, 2009.

GANDOLLA, M. *Municipal Waste Treatment Plants*. Tradução autorizada por Chirico, V. em 2013. Tradução de Gandolla 2013, Zurich: M.Schweizer Rück, 2013.

GITMAN, L.J. *Princípios de Administração Financeira*. 12 ed. São Paulo: Editora PEARSON, 2009.

GITMAN, L.J.; ZUTTER, C.J. *Princípios de Administração Financeira*. 14 ed. São Paulo: Pearson Universidades, 848 p., 2017.

GIUSTI, L. A review of waste management practices and their impact on human health. *Waste Manag*, v. 29, p. 2227–39, 2009.

GOHLKE O. *Efficiency of energy recovery from municipal solid waste and the resultant effect on the greenhouse gas balance*. *Waste Management & Research*, v. 27, p. 894-906, 2009.

GIZ - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management: A Guide for Decision Makers in Developing and Emerging Countries*. 2017. Disponível em: <https://www.giz.de/en/downloads/GIZ_WasteToEnergy_Guidelines_2017.pdf> Acesso em: 25 abr. 2020.

GRIFFITHS, A.J.; WILLIAMS, K.P. Thermal Treatment Options. *Waste Management World*, p.63-73, jul-ago 2005.

HENRIQUES, R.M. Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: Uma abordagem Tecnológica. Dissertação (Mestrado em em Ciências em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE, 2014. Rio de Janeiro – RJ, 189 fls.

HULGAARD, T., VEHLLOW, J. *Incineration: process and technology*, chapter 8.1. In: Christensen TH. *Solid waste technology and management*. Blackwell, s.l. John wiley & sons, Ltd Chichester, 1 ed. UK, 2011.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Projeção da população do Brasil e das unidades da federação*. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>> Acesso em: 25 nov. 2019.

IEA BIOENERGY. *Accomplishments from IEA Bioenergy Task 36: Integrating Energy Recovery into Solid Waste Management Systems (2007-2009)*. França: IEA, 2013. Disponível em: <http://www.iea-bioenergytask36.org/Publications/2007-2009/Full_reportFinal_hres.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2019.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA. *Sistema Internacional de Unidades – SI*. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012.

ISWA - International Solid Waste Association, Working Group on Energy Recovery, *Waste – to – Energy State – of – the – Art – Report*. 2012. Disponível em: http://www.iswa.org/index.php?eID=tx_iswaknowledgebase_download&documentUid=3119 Acesso em: 8 jan. 2019.

KARIDIS, A. The State of Waste-to-Energy in the U.S. 2019. Disponível em: <<https://www.waste360.com>> Acesso em: 15 ago. 2020.

KIM, M.H.; SONG, H.B.; SONG, Y.; JEONG, I.T.; KIM, J.W. Evaluation of foof waste disposal options in terms of global warming and energy recovery: Korea. *Int. J. Energy Environ. Eng.*, v. 4, p. 1-12, 2014.

KOTHARI, V.K.; TYAGI, V.V.; PATHAK, A. Renewable energy scenario in indian context: vision and achievements. *Renewable & Sustainable Energy*. v. 14, p. 3164-3170, 2010.

LAUSSELET, C.; CHERUBINI, F.; SERRANO, G.D.A.; BECIDAN, M.; STROMMAN, A. H. Life-cycle assessment of a Waste-to-Energy plant in central Norway: Current situation and effects of changes in waste fraction composition. *Waste Management*. v. 58, p. 191-201, 2016.

LEIBFRIED, H. J.; KATHLEEN, P.A. Benchmarking – Uma ferramenta para a melhoria contínua. 1ª Ed. São Paulo: Editora Campus, 1994.

LEMES, J.A.B.; CHEROBIM, A.P.; RIGO, C.M. *Administração Financeira: princípios, fundamentos e práticas brasileiras*. 12 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

LI, Y.; ZHAO, X.; LI, Y.; LI, X. Waste Incineration Industry and Development Policies in China. *Waste Manag.*, v. 46, p. 234–241, 2015.

LIGHT. *Consumo de eletricidade*. 2017. Disponível em: <<http://www.light.com.br/SitePages/default.aspx>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

LIMA, L.M.Q. *Lixo: Tratamento e Biorremediação*. Brasil: Hemus Editora, 2004.

LIMA, J.D. Modelos de apoio a decisão para alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, 2012. Recife – PE, 400 fls.

LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E.; CORTI, A. A Review of Technologies and Performances of Thermal Treatment Systems for Energy Recovery from Waste. *Waste Manage*. v. 37, p. 26-44, 2015.

LOUREIRO, S.M., ROVERE, E.L.L., MAHLER, C.F. Analysis of potential for reducing emissions of greenhouse gases in municipal solid waste in Brazil in the state and city of Rio de Janeiro. *Waste Management*. v. 33, p. 1302–12, 2013.

MACHADO, H. H. S.; SGORLON, J. G.; ALTOÉ, S. P. S.; MENEGUETTI, K. S.; OLIVEIRA, J. C. D.; MARTINS, C. H.; NETO G. A.; TAVARES, C. R. G. *A gestão dos resíduos sólidos industriais aplicada em países desenvolvidos e em desenvolvimento*. I Congresso Latino-Americano de Ecologia Urbana. Argentina, 2012.

MAISIRI, W.; VAN.DYK, L.; KOCK, J. *Financial analysis of waste-to-energy grate incineration power plant for a small city*. International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE). Cape Town, South Africa: IEEE, 2015.

MAKARICHI, L.; JUTIDAMRONGPHAN, W.; TECHATO, K. The Evolution of waste-to-energy incineration: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 91, p. 812-821, 2018.

MALINAUSKAITE, J.; JOUHARA, H.; CZAJCZYŃSKA, D.; STANCHEV, P.; KATSOU, E.; ROSTKOWSKI, P.; THORNE, R.J.; COLÓN, J.; PONSÁ, S.; AL-MANSOUR, F.; ANGUILANO, L.; KRZYŻYŃSKA, R.; LÓPEZ, I.C.; VLASOPOULOS, A.; SPENCER, N. Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. *Energy*. v. 141, p. 2013-2044, 2017.

MANNARINO, C.F.; FERREIRA J.A.; GANDOLLA M. Contribuições para a evolução do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil com base na experiência Européia. *Engenharia Sanitária Ambiental*, v.21, p. 379-385, abr/jun 2016.

MARTIN, U.; MARTIN, J.; KORALEWSKA, R. WTE, The Martin WTE Technology. 1 ed. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. New York, NY: Springer, 2017.

MASSARUTTO A. Waste management as a public utility: options for competition in an environmentally-regulated industry. *Utilities Policy*. v. 15, p. 9–19, 2007.

MASSARUTTO, A. Economic aspects of thermal treatment of solid waste in a sustainable WM system. *Waste Management*, v. 37, p. 45-57, mar.2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.08.024.

MAVROPOULOS, A. Thermal treatment in transition countries. Is there any future and how?. *Seminário Internacional de Tecnologias e Gestão de Resíduos Sólidos*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, p. 26-28, maio 2010.

MESSENGER, B. Waste to Energy Planning in the Developing World. *Waste Management World*. p. 22-26, nov./dec. 2019. Disponível em: <<https://waste-management-world.com/waste-to-energy>>. Acesso em: 25 set. 2019.

MINAS GERAIS. Lei nº 21.557, de 22 de dezembro de 2014. Dispõe sobre a política estadual de resíduos sólidos com o objetivo de proibir a utilização da tecnologia de incineração nos casos que especifica. *Constituição do Estado de Minas Gerais*, MG, 22 dez. 2014.

NI, Y., ZHANG, H., FAN, S., ZHANG, X., ZHANG, Q., CHEN, J. Emissions of PCDD/Fs from Municipal Solid Waste Incinerators in China. *Chemosphere*, v. 75, p. 1153–1158. 2009.

NIXON, J.D.; WRIGHT, D.G.; DEY, P.K.; GHOSH, S.K.; DAVIES, P.A. A comparative assessment of waste incinerators in the UK. *Waste Management*, v. 33, p. 2234–2244, 2013. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.08.001.

NZIHOU, A.; THEMELIS N. J.; KEMIHA, M.; BENHAMOU, Y. Dioxin emissions from municipal solid waste incinerators (MSWIs) in France. *Waste Management*, v. 32, n. 12, p. 2273–2277, 2012.

O'BRIEN, J.K. Economic benefits of waste-to-energy: jobs creation and community development. *MSW Management*, Vol.23 No. 4, p. 12-19, 2013.

OFEV – OFFICE FEDERAL DE L'ENVIRONNEMENT. Portaria de Proteção Aérea (OPair - Ordonnance sur la protection de l'air) de 16 de dezembro de 1985. 11 dez. 2018.

OLIVEIRA, T. S. Análise de Localização de Incineradores de Resíduos Sólidos Urbanos na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2020.

OMARI, A.M.; KICHONGE, B.N.; JOHN, G.R.; NJAU, N.K.; MTUI, P.L. Potential of municipal solid waste, as renewable energy source - a case study of Arusha, Tanzania. *International Journal of Renewable Energy Technology Research*. v. 3, p. 1-9, Jun. 2014.

ONU MEDIO AMBIENTE. *Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe*. Organização das Nações Unidas, ONU Panamá, 2018.

PANEPINTO, D.; ZANETTI, M.C. Municipal solid waste incineration plant: A multi-step approach to the evaluation of an energy configuration. *Waste Management*. v. 73, p. 332-341, 2018.

PASIN, J. A. B.; BORGES, L. F. X. *A nova definição de parceria público-privada e sua aplicabilidade na gestão de infraestrutura pública*. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES.), 2003.

PMI - PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. 6ed. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*. Body of Knowledge. Project Management Institute: Pennsylvania, 2017.

PORTEOUS, A. Why energy from waste incineration is an essential component of environmentally responsible waste management. *Waste Management*. v. 25, p. 451-459, 2015.

PSOMOPOULOS, C.S.; BOURKA, A.; THERMETIS, N.J. Waste to energy: A review of the status and benefits in USA. *Waste Management*. v. 29, p. 1718-1724, 2009.

PSOMOPOULOS C.S., STAVROULAKIS C., STAVROPOULOS V. AND THEMELIS N.J. Greenhouse gases emission reduction potential in Greece by implementing WTE facilities in strategically selected urban areas. *Fresenius Environmental Bulletin*, Vol. 22, p. 2042 – 2047, 2013.

PSOMOPOULOS, C.; VENETIS, I.; THEMELIS, N. The impact from the implementation of WtE to the economy. A macroeconomic approach for the trade balance of Greece. *Fresenius Environmental Bulletin*, v. 23, p. 2735-2741, 2014.

QY RESEARCH. *Waste Incinerators Market Potential Growth, Share, Demand and Analysis of Key Players- Research Forecasts to 2025*, 2019. Disponível em: <

<https://icrowdnewswire.com/2019/07/24/waste-incinerators-market-potential-growth-share-demand-and-analysis-of-key-players-research-forecasts-to-2025/>>. Acesso em: 13 fev. 2019.

RAGOSSNIG, A.M.; VUJIĆ, G. Challenges in technology transfer from developed to developing countries. *Waste Management & Research*. v. 33, p. 93-95, 2015.

RABL, A.; SPADARO, J.V. Health impacts of waste incineration. In: Issues in Environmental Science and Technology, Environmental Impact of Solid Waste Management Activities. *Royal Society of Chemistry*. UK. v. 18, p. 171-193, 2002.

RAND, T.; HAUKOHL, J.; MARXEN, U. *Incineration plant economics and finance in Municipal Solid Waste Incineration: Requirements for a Successful Project*. Washington D.C.: World Bank Publications. p. 25-32, 2000.

RIO DE JANEIRO. *Municipal Integrated Management Plan of Solid Waste of Rio de Janeiro City*. City Hall of Rio de Janeiro. 2015. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/>>. Acesso em: 22 jul. 2018.

RODRIGUEZ, M.E.D.B. *Cost-benefit analysis of a waste to energy plant for Montevideo; and waste to energy in small islands*. 2011. M.S. degree in Earth Resources Engineering - Department of Earth and Environmental Engineering Columbia University, Out. 2011.

ROSS, S.A., WESTERFIELD, R.W., JORDAN, B.D. *Fundamentos de Finanças Corporativas*. 9 ed. Porto alegre: McGraw-Hill, 2018.

SCARLAT, N.; FERNANDO FAHL, F.; DALLEMAND, J.-F. Status and Opportunities for Energy Recovery from Municipal Solid Waste in Europe. *Waste and Biomass Valorization*, v. 10, p. 2425–2444, 2019.

SCHROEDER, J. T.; SCHROEDER, I.; COSTA, R. P.; SHINODA, C. O custo de capital como taxa mínima de atratividade na avaliação de projetos de investimento. *Revista Gestão Industrial*. v.1, n.2, 30 maio 2005.

SIGG, F. EfW – An important step toward zero waste (nothing is non-recyclable) Incinerator Bottom Ash, Available Technologies and How it is Handled in Different Countries. *Recycling and Waste Management*. Birmingham, UK, 2012.

SMA. Resolução SMA nº 079, de 04 de novembro de 2009. Estabelece diretrizes e condições para a operação e o licenciamento da atividade e tratamento térmico de resíduos sólidos em Usinas de Recuperação de Energia (URE). *Secretaria de Estado do Meio Ambiente, São Paulo, SP*. 2009.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (2018) Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2018. 2018. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental Ministério das Cidades. Disponível em: <<http://snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos>>. Acesso em: 15 abr. 2018.

SORA, M.J. Incineration overcapacity and waste shipping in Europe: the end of the proximity principle?. Global Alliance for Incinerator Alternatives. 2013. Disponível em: <<http://www.no-burn.org>>. Acesso em: 15 mar. 2019.

SOÓS, R. et al. Operator models for delivering municipal solid waste management services in developing countries: Part B: Decision support. *Waste Management & Research*. v. 35, p. 842-862, 2017.

SORRELL, S. Reducing energy demand: a review of issues, challenges and approaches. *Renew Sustain Energy*. v 47, p. 74-82, 2015.

SOUZA A.B. *Projetos de investimentos de capital: elaboração, análise, tomada de decisão*. São Paulo: Atlas, 2003.

STANTEC. *A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices*. Stantec, BC, 2011. Disponível em: <<http://www.env.gov.bc.ca/epd/epdpa/mpp/pdfs/BCMOE-WTEEmissions-final.pdf>> Acesso em: 04 jan 2018.

TEHRANI, F.B.; HAGHI, E. *Techno-economic assessment of municipal solid waste incineration plant-case study of Tehran, Iran*. *Environmental Science*, 2015. Disponível em: <https://wteinternational.com/wp-content/uploads/2015/09/Techno-economic-assessment-of-municipal-solid-waste-incineration-plant-case-study-of-Tehran-Iran-1.pdf>. Acesso em: 09 set. 2019.

THEMELIS, N.J.; DIAZ BARRIGA, M.E.; ESTEVEZ, P.; VELASCO, M.G. *Guidebook for the application of Waste-To-Energy technologies in Latin America and the Caribbean*. Earth Engineering Center: Interamerican Development Bank, New York (NY), 2013.

THEMELIS, N.J.; DIAZ BARRIGA, M.E.; ESTEVEZ, P.; VELASCO, M.G. *Recovery of Materials and Energy from Urban Wastes*. A Volume in the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Second Edition: Interamerican Development Bank, New York (NY), 2019. Doi: 10.1007/978-1-4939-7850-2.

THEMELIS, N.J.; BOURTSALAS, A.C. *Recovery of Materials and Energy from Urban Wastes*. A Volume in the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. Springer-Verlag. 2ª Ed. New York, 2019.

TABASOVA, L.; KROPAC, V.; KERMES, A.; NEMET, P. *Waste-to-Energy Technologies: Impact on Environment*. *Energy*, v. 44, p. 146-155, aug. 2012.

THI PHUONG, T.P.; RAJNI, K.; GANESH, K.P.; RUSSELL, M.; RAJASEKHAR, B. Current updates on waste to energy (WtE) technologies: a review. *Renewable Energy Focus*, v. 24, n. 0, mar. 2018.

TOLMASQUIM, M.T. *Renewable sources of energy in Brazil*. 1 ed. Rio de Janeiro: Interciência, p. 515, 2003.

TRIDEL - USINE DE VALORISATION THERMIQUE ET ÉLECTRIQUE DE DECHETS. *Emissions à la cheminée - tableau comparatif 2017/2018/2019*, 2019. Disponível em: < <http://www.tridel.ch/fr/protection-de-lair>> Acesso em: 15 ago 2019.

TURCONI, R.; BUTERA, S.; BOLDIN, A.; GROSSO, M.; RIGAMONTI, L.; ASTRUP, T. Life cycle assessment of waste incineration in Denmark and Italy using two LCA models. *Waste Management*. v. 29, p. 78-90, 2011.

TYAGI, V.K.; LO, S.L. Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery?. *Renewable & Sustainable Energy*. v. 25, p. 708-728, 2013.

UE – UNIÃO EUROPÉIA. Conselho da União Europeia. *Diretiva 75/442/EEC* – Relativa à resíduos. 15 jul. 1975.

UE – UNIÃO EUROPÉIA UE. Conselho da União Europeia. *Diretiva 89/369/EEC* – Relativa à prevenção da poluição atmosférica proveniente de novas instalações de incineração de resíduos urbanos, 8 jun. 1989.

UE – UNIÃO EUROPÉIA UE. Conselho da União Europeia. *Diretiva 89/429/EEC* – Relativa à redução da poluição atmosférica proveniente das instalações existentes de incineração de resíduos urbanos, 21 jun. 1989.

UE – UNIÃO EUROPÉIA UE. Conselho da União Europeia. *Diretiva 91/157/EEC* – Relativa à baterias e acumuladores contendo certas substâncias perigosas, 18 mar. 1991.

UE – UNIÃO EUROPÉIA UE. Conselho da União Europeia. *Diretiva 94/67/EC* – a incineração de resíduos perigosos (incluindo co-geração). 16 dez. 1994a.

UE – UNIÃO EUROPÉIA UE. Conselho da União Europeia. *Diretiva 94/62/EC* – Estabelece as regras da União Europeia para a gestão das embalagens e dos resíduos de embalagens. 20 dez. 1994b.

UE – UNIÃO EUROPÉIA UE. Conselho da União Europeia. *Diretiva 1999/31/EC* – Relativa à deposição de resíduos em aterros, 26 abr. 1999.

UE – UNIÃO EUROPÉIA UE. Conselho da União Europeia. *Diretiva 2000/76/EC* – Relativa à incineração de resíduo. 04 dez. 2000.

UE – UNIÃO EUROPÉIA UE. Conselho da União Europeia. *Diretiva 2010/75/EC* – Relativa às emissões industriais (prevenção e controlo integrados da poluição). 24 nov. 2010.

UNEP - United Nations Environment Programme. Single-use Plastics: A Roadmap for Sustainability. 2018. Disponível em: < <https://www.unenvironment.org/resources/report/single-useplastics-roadmap-sustainability>>. Acesso em: 14 out. 2020

UNIDO – UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION. Industrial Statistics Database, 2019. Industrial Statistics Database. 2019. Disponível em: <<https://www.unido.org/researchers/statistical-databases>>. Acesso em: 04 abr. 2019.

UN ENVIRONMENT. Waste Management Outlook for Latin America and the Caribbean. United Nations Environment Programme, 2018. Disponível em: <<https://www.unenvironment.org>> Acesso em: 25 dez. 2019.

UN ENVIRONMENT. Waste Management: Considerations for informed decision-making. From International Environmental Technology Centre. 2019. Disponível em: <<https://www.unenvironment.org>> Acesso em: 21 set. 2020.

UN HABITAT. *Solid Waste Management in the World's Cities*. United Nations Human Settlements Program. Earthscan for UN-Habitat: Nairobi. 2019.

USEPA: United States Environmental Protection Agency. *Regulatory Information By Sector*. 2019. Disponível em: <<https://www.epa.gov/>> Acesso em: 12 maio 2019.

VAN DER HEIJDEN, K. *Planejamento por cenários: a arte da conversação estratégica* 2a ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

VERGARA, S.C., TCHOBANOGLIOUS, G. Municipal solid waste and the Environment: A global perspective. Annual Review of Environment and Resources. *Annual Review of Environment and Resources*. v.37, p. 277-309, 2012.

WALKER, R. Winning with risk management. v. 2. [s.l]: *World Scientific*, 2013.

WALTERS, D. Supply chain risk management: vulnerability and resilience in logistics. London: Kogan Page, 2007.

WRAP, 2018. Gate Fees 2017/18 Final Report: Comparing the costs of alternative waste treatment options. Disponível em: <http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/WRAP%20Gate%20Fees%202018_exec+extended%20summary%20report_FINAL.pdf> Acesso em: 12 maio 2019.

SUNK, W.; THEMELIS, N.J. Increasing the Quantity and Quality of Metals Recovered at Waste-to Energy Facilities. NAWTEC 14-3197, pp. 165-174, 2008.

WORLD BANK. *Municipal Solid Waste Incineration: the International Bank for Reconstruction and Development*. The World Bank, Washington D.C., 1999a.

WORLD BANK. *Decision makers' Guide to Solid Waste Incineration*. The World Bank, Washington D.C., 1999b.

WORLD BANK. *Municipal Solid Waste Incineration. A Decision Maker's Guide*. The World Bank, Washington D.C., 2000.

WORLD BANK. *What a waste: a global review of solid waste management*. The World Bank, Washington D.C., 2012a.

WORLD BANK. *From Gap to Opportunity: Business Models for Scaling Up Energy Access*. The World Bank, Washington D.C., 2012b.

WORLD BANK. What a waste: a Global Review of Solid Waste Management. Urban Development & Local Government Unit World Bank, Washington D.C., 2012c.

WORLD BANK. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development & Local Government Unit World Bank, Washington D.C., 2018a.

WORLD BANK. Decision Maker's Guides for Solid Waste Management. Technologies. World Bank Social, Urban, Rural & Resilience Global Practice, the Urban Development Series, Washington D.C., 2018b.

WORLD ENERGY COUNCIL. *World Energy Resources, 2016*. Disponível em: <<https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources-Fullreport-2016.10.03.pdf>> Acesso em: 25 abr 2020.

WSP. *Waste technologies: waste to energy facilities: a Report for the Strategic Waste Infrastructure Planning (SWIP)*. Working Group Compiled by WSP Environmental Ltd for the Government of Western Australia, Department of Environment and Conservation. May 2013. Disponível em: <http://energy.cleartheair.org.hk/wp-content/uploads/2016/05/SWIP_Waste_to_Energy_Review.pdf> Acesso em: 30 abr 2020.

YAN, M.; WALUYO, J.; AGAMUTHU, P. Challenges for Sustainable Development of Waste to Energy in Developing Countries. *Waste Management & Research*. v. 38, p. 229-231, 2020.

ZENG, M.; LI, C.; ZHOU, L. Progress and prospective on the police system of renewable energy in China. *Renew. Sustain. Energy Rev.* v. 20, p 36–44, 2013.

ZHAO, C. Evaluation of municipal waste incinerators (MWI) site selection based on full cost accounting using GIS tools: a case study in Beijing, China. 2017. Disponível em: <<https://download.atlantispress.com/proceedings/mseee-17/25882237>> Acesso em: 23 out. 2020.

ZHANG, D.; HUANG, G.; XU, Y.; GONG, Q. Waste-to-energy in China: key challenges and opportunities. *Energies* 8, 14182– 14196, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en81212422>> Acesso em: 30 abr. 2020.

YU, H.; SOLVANGA, W.D. A multi-objective location-allocation optimization for sustainable management of municipal solid waste. *Environment Systems and Decisions*. 37: 289, 2017. Doi: /10.1007/s10669-017-9632-y

WTERT - U.S. and Global Waste-to-Energy Information. *The Waste-to-Energy Research and Technology Council (WTERT)*, 2014. Disponível em: <<https://gwcouncil.org/>> Acesso em: 30 abr. 2020.