



**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

HERBERTH ALVES DE SOUZA

**VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UMA
PLANTA DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
PARA PEQUENOS MUNICÍPIOS**

PALMAS-TO

2020

HERBERTH ALVES DE SOUZA

**VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UMA
PLANTA DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
PARA PEQUENOS MUNICÍPIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental - PPGEA como requisito parcial para à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Joel Carlos Zukowski Junior

Coorientador: Prof. Dr. Aurélio Pessôa Picanço

PALMAS-TO

2020

FOLHA DE APROVAÇÃO

HERBERTH ALVES DE SOUZA

VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UMA PLANTA DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA PEQUENOS MUNICÍPIOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Nível Mestrado Profissional, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. A presente dissertação foi aprovada pela Banca Examinadora composta pelos membros abaixo relacionados:

BANCA EXAMINADORA



Dr. Joel Carlos Zukowski Junior (Presidente)
Universidade Federal do Tocantins

P/P: 

Dr. Aurélio Pessoa Picanço (Membro Titular Interno)
Universidade Federal do Tocantins

P/P: 

Dr. Marcelo Mendes Pedroza (Membro Titular Interno)
Universidade Federal do Tocantins

P/P: 

Dr. Fabrício Machado Silva (Membro Titular Externo)
Faculdade ITOP

Aprovada em: 28 de setembro de 2020

Universidade Federal do Tocantins, Campus Universitário de Palmas

O evento foi realizado por meio de vídeo conferência, conforme Art. 56-A da Resolução nº 13, de 23 de março de 2017, pela necessidade cautelar de distanciamento social em virtude da pandemia causada pelo coronavírus (SARS-Co V-2)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

A474v ALVES DE SOUZA, HERBERTH .
VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UMA PLANTA
DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA PEQUENOS
MUNICÍPIOS. / HERBERTH ALVES DE SOUZA. – Palmas, TO, 2020.
70 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins
– Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado)
Profissional em Engenharia Ambiental, 2020.

Orientador: Joel Carlos Zukowski Junior

Coorientador: Aurélio Pessoa Picanço

1. Incineração. 2. Viabilidade econômica. 3. Resíduos sólidos urbanos. 4.
Rejeitos. I. Título

CDD 628

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer
forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte.
A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184
do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

Dedico este trabalho a minha esposa pelo apoio fundamental e ao meu filho que nasceu no decorrer do programa.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo dom da vida e por Ele estar sempre iluminando os meus caminhos;

A toda minha família, em especial a minha esposa que me apoiou em todas as escolhas e caminhos traçados;

A Universidade Federal do Tocantins (UFT) por ter me concedido a licença para qualificação;

A todos os professores do programa de mestrado profissional em Engenharia Ambiental, pela dedicação na profissão docente e pelos ensinamentos transmitidos;

Em especial, ao meu orientador, professor Joel Carlos Zukowski Junior, e ao meu coorientador, professor Aurélio Pessoa Picanço, pela atenção e valiosas orientações;

Ao professor Marcelo Mendes Pedroza pela importante contribuição dada ao trabalho;

A todos os professores do programa de Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental, pela dedicação na profissão docente e pelos ensinamentos transmitidos;

Aos ilustres membros da Banca de Avaliação, por estarem contribuindo com esta marcante fase da minha formação;

Aos meus colegas de programa e companheiros de estudo, em especial ao colega Tiago Sodré, pelo apoio dado e compartilhamento de conhecimento, vocês sempre estiveram presentes nos momentos de dificuldades e me passavam palavras de otimismo e motivação, muito obrigado;

Ao meu grande amigo, Cristiano Dionísio Lira e Silva (in memoriam), que faleceu recentemente. Sempre me lembrarei de você, sei que está ao lado do Pai olhando por todos nós. As lembranças dos momentos alegres que tivemos juntos nunca se apagarão, sua bondade, humildade e honestidade servirão de exemplo para muitas outras pessoas.

RESUMO

O crescimento da produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil é um grande desafio a ser enfrentado. A disposição inadequada dos resíduos é capaz de causar sérios prejuízos ao meio ambiente. O gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos engloba não só o seu destino adequado, mas também qual tecnologia pode ser mais economicamente viável para o seu tratamento. Este trabalho estudou as características dos resíduos de 10 municípios da região norte do estado do Tocantins e verificou a viabilidade econômica da implantação de uma planta de incineração de resíduos sólidos urbanos para pequenos municípios. A análise foi realizada por meio de pesquisas em literaturas técnicas, estimou-se a geração de RSU destas cidades, estimando-se também as receitas que poderiam ser geradas pela planta de incineração, além do seu custo de operação e de manutenção. Para a análise econômica, foram considerados, entre outros parâmetros econômicos, o VPL, TIR, PAYBACK e a TMA. Foram propostos três cenários econômicos: 1º cenário receita mínima; 2º cenário receita prevista; 3º cenário no qual dobrou-se a TMA. Foi realizada a avaliação confrontando os três cenários de modo a verificar qual seria o cenário mais viável economicamente. Considerou-se, para este estudo, o período de 20 anos de operação do sistema. O cenário 2 mostrou-se virtualmente mais viável com VPL de R\$ 45.756.248,17; TIR de 81,66%; Payback de 1,23 anos a uma TMA de 4,5%. Concluiu-se que a planta de incineração de RSU é viável para pequenos municípios em todos os cenários comparados e que esta viabilidade depende dos parâmetros econômicos, investimentos e da relação entre receitas e despesas do projeto. Destaca-se a relevância em se fazer previamente a análise do resíduo e se necessário a realização de um pré-tratamento para que ele se adeque às condições técnicas da planta.

Palavras chave: Incineração; Viabilidade econômica; Resíduos sólidos urbanos; Rejeitos; Matéria Orgânica.

ABSTRACT

The growth in the production of solid urban waste in Brazil is a major challenge to be faced. Inadequate waste disposal is capable of causing serious damage to the environment. The management of urban solid waste encompasses not only its proper destination, but also examines which technology may be more economically viable for its treatment. This work studied the characteristics of the residues of 10 municipalities in the northern region of the state of Tocantins and, thus, the economic viability of implementing an urban solid waste incineration plant for small municipalities was verified. This analysis was made by means of research in technical literature that estimated the generation of MSW in these cities, estimating the revenues that could be generated by the incineration plant and its cost of operation and maintenance. For economic analysis, the following were considered, among other economic parameters, NPV, TIR, PAYBACK and TMA. In this way, three economic scenarios were proposed: 1st minimum revenue scenario; 2nd scenario expected revenue and 3rd scenario where the TMA doubles. In these conditions, it was evaluated which of the three scenarios was the most economically viable in a period of 20 years. Scenario 2 proved to be virtually the most viable with NPV of R \$ 45,756,248.17, IRR of 81.66%, Payback of 1.23 years at a TMA of 4.5%. It was concluded that the MSW incineration plant is viable for small municipalities in all the compared scenarios and that this viability depends on the economic parameters, investments and the relationship between project income and expenses. The relevance of pre-analyzing the residue is highlighted and, if necessary, pre-treatment is carried out so that it adapts to the technical conditions of the plant.

Keywords: Incineration, Economic viability, urban solid waste, Waste, Organic matter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Processos de conversão e seus possíveis subprodutos.....	20
Figura 2- Desenho esquemático de uma usina de Incineração.....	25
Figura 3- Mapa de localização da cidade de Augustinópolis.....	36
Figura 4- Esquema das etapas de trabalho.....	37
Figura 5- Fluxograma de processo RGH 3000 FL 8500.....	41
Figura 6- Estimativas e projeções da geração geral de RSU.....	42
Figura 7- Estimativas e projeções da geração de rejeitos e matéria orgânica.....	43
Figura 8- Evolução das receitas e despesas para o cenário 1.....	54
Figura 9- Evolução das receitas e despesas para o cenário 2 e 3.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Limites para classificação dos RSUE.....	27
Tabela 2 Estimativas e projeções da geração geral de RSU.....	42
Tabela 3 Estimativas e projeções da geração de rejeitos e matéria orgânica	43
Tabela 4- Dados fundamentais da planta.....	46
Tabela 5- Receitas geradas pela planta para 2019.....	47
Tabela 6- Estimativo da constituição gravimétrica dos municípios toneladas dia 2019.	48
Tabela 7- Estimativo de receitas com a venda de recicláveis para o ano de 2019.	49
Tabela 8- Detalhamento dos investimentos iniciais	49
Tabela 9- Investimentos iniciais e custo de operação e manutenção	50
Tabela 10- Investimento e custo de operação de um aterro de pequeno porte 2019.....	51
Tabela 11- Disposição da porcentagem dos gastos das fases de viabilidade de um aterro de pequeno porte	51
Tabela 12- Parâmetros econômicos para o cenário 1	53
Tabela 13- Evolução das receitas e despesas para o cenário 1	53
Tabela 14- Parâmetros econômico para o cenário 2.....	54
Tabela 15- Evolução das receitas e despesas para o cenário 2.....	55
Tabela 16- Comparação dos parâmetros econômicos	55
Tabela 17- Parâmetros econômicos para o cenário 3	57
Tabela 18- Evolução das receitas e despesas para o cenário 3.....	57

LISTA DE SIGLAS

ABETRE	Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BCB	Banco Central do Brasil
CDR	Combustível Derivado de Resíduos
CDRU	Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos
CEN	Comitê Europeu de Normalização
FGV	Fundação Getúlio Vargas
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
IPCA	Índice de Preços ao Consumidor Amplo
IRR	Internal Rate of Return
MDL	Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
NBR	Norma Brasileira
NPV	Net Present Value
PAYBACK	Tempo de Retorno do Investimento
PCI	Poder Calorífico Inferior
PERS-TO	Plano Estadual de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCE	Reduções Certificadas de Emissão
RM	Ringgit Malaio
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RSUE	Resíduos Sólidos Urbanos Para Fins Energéticos
SEMARH	Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SIMA	Secretaria de Estado de Infraestrutura e Meio Ambiente de São Paulo
SMA	Secretaria de Estado e Meio Ambiente de São Paulo
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
UFT	Universidade Federal do Tocantins
UNIFEMM	Centro Universitário de Sete Lagoas
URE	Unidade de Recuperação Energética
USD	Dólar
UTH	Usina Termelétrica Híbrida
UTM	Universal Transversa Mercator
VPL	Valor Presente Líquido
WHO	World Health Organization
WTE	Waste to Energy

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO GERAL	16
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3	REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1	APROVEITAMENTO ENERGÉTICO.....	17
3.1.1	Projeção da população futura	18
3.1.2	Potencial de recuperação energética da incineração de RSU	19
3.2	INCINERAÇÃO	21
3.3	UMIDADE DOS RSU	28
3.4	COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	28
3.5	COGERAÇÃO DE ENERGIA.....	29
3.6	VIABILIDADE ECONÔMICA.....	31
3.6.1	Valor presente líquido (VPL)	32
3.6.2	Taxa interna de retorno (TIR)	32
3.6.3	Tempo de retorno do investimento (Payback)	33
3.7	CRÉDITOS DE CARBONO	33
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	PROJEÇÃO DA GERAÇÃO DE RSU DE PEQUENOS MUNICÍPIOS.....	37
4.2	ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA GERADA PELA PLANTA	38
4.3	ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA PLANTA DE INCINERAÇÃO DE RSU.....	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1	DADOS SOBRE OS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) DOS MUNICÍPIOS.....	42
5.2	PLANTA TÉRMICA DE INCINERAÇÃO	44
5.2.1	Sistema de tratamento de gases FL 8500	45

5.2.2 Monitoramento contínuo dos gases	46
5.3 POSSÍVEIS RECEITAS GERADAS PELA PLANTA	46
5.3.1 Receitas com o tratamento dos RSU	46
5.3.2 Potencial de recuperação energética	47
5.4 ANÁLISE ECONÔMICA DA PLANTA TÉRMICA	47
5.4.1 Receitas geradas pela planta	47
5.5 CONSTITUIÇÃO GRAVIMÉTRICA DAS CIDADES DO ESTUDO DE CASO	48
5.5.1 Comércio de recicláveis	49
5.5.2 Investimentos iniciais e custos de operação e manutenção	49
5.5.3 Estimação do custo de implantação e operação de um aterro sanitário de pequeno porte	50
5.5.4 Comparação entre os investimentos e os custos de manutenção e operação entre aterro sanitário de pequeno porte e a planta térmica de incineração	52
5.6 CENÁRIOS PROPOSTOS	52
5.6.1 1º Cenário	52
5.6.2 2º Cenário	54
5.6.3 3º Cenário	56
6 CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

Em 2018, o Brasil produziu 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos. Deste total, 92% (72,7 milhões) foram recolhidos e 6,3 milhões não. Desses resíduos, 59,5%, correspondem a 43,3 milhões de toneladas dos resíduos recolhidos e tiveram a sua disposição apropriada em aterros sanitários e 40,5% foram dispostos inapropriadamente em 3.001 municípios e 29,5 milhões destinados a lixões ou aterros controlados. A geração de resíduos teve uma elevação de menos de 1% com referência ao ano anterior, entretanto a coleta aumentou em 1,66% em comparação ao ano de 2017. Já a disposição adequada obteve uma baixa elevação. As cidades investiram em média R\$ 10,15 (dez reais e quinze centavos) por habitante em serviços de limpeza urbana e movimentaram um montante de R\$ 28,1 bilhões (vinte e oito bilhões e cem milhões de reais), baixa de 1,28% se comparado a um ano antes (ABRELPE, 2019).

A acomodação inapropriada de resíduos sólidos é capaz de gerar efeitos impactantes ao meio ambiente por meio da poluição do solo e das águas, atraindo transmissores de doenças como moscas, ratos, urubus. Estes motivos elevam para mais negativamente os índices relativos às condições de saúde pública. A população que não tem saneamento em relação aos serviços de abastecimento de água, coleta e tratamento de esgoto, pode ver, ainda, seus reservatórios sofrerem contaminação por despejos provenientes da degradação dos resíduos (SEABRA; GALLEG; GONÇALVES, 2016).

Conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305, a contribuição financeira e técnica pode ocorrer entre as entidades de administração pública e instituições privadas como mecanismo efetivo de colaboração com o objetivo de alcançar o progresso em estudos sobre inovação em termos de materiais, técnicas, procedimentos e novas tecnologias de gerenciamento, trato dos resíduos, reciclagem, reutilização e acomodação final ambientalmente correta dos rejeitos (BRASIL, 2010).

A Lei nº 12.305 determina que deve-se buscar que sejam empregadas tecnologias que tenham a finalidade de restauração energética de resíduos sólidos urbanos (RSU), uma vez que se comprove a sua efetividade técnica e ambiental, junto com o estabelecimento de ações de monitoramento do lançamento de gases tóxicos aceitas pelas entidades ambientais (BRASIL, 2010).

A portaria interministerial nº 274, de 2019, disciplinou a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos em atendimento ao disposto no § 1º, do art. 9º, da Lei nº 12.305 de

2010 e no art. 37, do Decreto nº 7.404, de 2010. O art. 2º, inciso I, trouxe a definição de Usina de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos – URE, como sendo um local destinado ao tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com a sua recuperação de energia com a finalidade de diminuição de quantidade e periculosidade, de preferência agregada à produção de energia térmica ou elétrica (BRASIL, 2019).

Essa portaria interministerial estabeleceu, ainda, que recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos compõe uma das maneiras de destinação final ambientalmente apropriadas e sujeita de ser adotada, resguardadas as possibilidades prioritárias de não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, de acordo com o que preconiza o *caput* e § 1º, do art. 9º, da Lei n. 12.305. Poderão ser conduzidos para as unidades de recuperação energética os resíduos oriundos de atividades de varrição, resíduos sólidos derivados da limpeza urbana de vias públicas, logradouros e outros, além dos resíduos domésticos de moradias urbanas. (BRASIL, 2019).

A lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020, fez atualizações no marco legal do saneamento modificando a Lei nº 12.305 que dispõe sobre o conteúdo mínimo do plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos. A periodicidade de sua revisão, observará o prazo máximo de 10 (dez) anos e a disposição final, ambientalmente adequada dos rejeitos, deverá ser implementada até 31 de dezembro de 2020, com exceção dos Municípios que até essa data já tenham concebido plano intermunicipal de resíduos sólidos ou plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos e que possuam mecanismos de cobrança que assegurem a sua sustentabilidade econômico-financeira, para o qual ficam determinados os prazos máximos de: 2 de agosto de 2021, para capitais de Estados e Municípios integrantes de Região Metropolitana (RM) ou de Região Integrada de Desenvolvimento (Ride) de capitais; 2 de agosto de 2022, para Municípios com população superior a 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010, bem como para Municípios cuja mancha urbana da sede municipal esteja situada a menos de 20 (vinte) quilômetros da fronteira com países limítrofes; 2 de agosto de 2023, para Municípios com população entre 50.000 (cinquenta mil) e 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010; 2 de agosto de 2024, para Municípios com população inferior a 50.000 (cinquenta mil) habitantes no Censo 2010.

Nas situações em que a disposição de rejeitos em aterros sanitários for economicamente inviável, poderão ser empregadas outras maneiras, consideradas as normativas técnicas e de operação definidas pelo órgão competente, de forma a impedir prejuízos ou ameaças à saúde pública e à segurança, minorando, deste modo, os impactos ambientais (BRASIL, 2020).

Entre as opções de natureza energética, a biomassa mostra-se em evidência no cenário brasileiro e mundial por possuir um grande potencial de utilização na base energética. Os aspectos climáticos contribuem para a geração dessa matéria-prima de forma a atender à sua procura cada vez maior. Esse é um dos motivos que justificam a atenção que se dá às pesquisas relacionadas à geração de combustíveis por meio da biomassa. É conveniente e se faz necessário o aperfeiçoamento das técnicas e métodos de transformação térmica para estes materiais, isso devido ao fato de que uma parcela significativa das potencialidades dos bicomcombustíveis no Brasil não está sendo aproveitada energeticamente (RIBEIRO, 2007).

Cabe lembrar que as nações da Europa e o Japão empregam a técnica de incineração como uma atividade habitual, as leis nesses países frequentemente passam por revisões e o controle é rígido. Os produtores de peças e equipamentos aperfeiçoam-se continuamente atendendo às inovações tecnológicas, disponibilizando possibilidades atuais e limpas e incrementando a eficiência no tratamento dos resíduos sólidos (FREIRE, 2013).

Atualmente, encontram-se mais de 1700 plantas de Waste to Energy (WtE) no mundo, 80% delas estão situadas em nações modernas, tais como a França, Estados Unidos, Japão e Alemanha. Entre Japão e Estados Unidos existe uma enorme desigualdade na quantidade de suas plantas, todavia os dois incineram volumes parecidos de resíduos sólidos urbanos (RSU) com restauração térmica. As plantas WtE do Japão possuem baixa capacidade de incineração.

As únicas plantas Térmicas WtE na América Latina e no Caribe estão situadas em Bermuda (Território Britânico Ultramarino), São Bartolomeu (Região Francesa) e Martinica (Região Francesa). A Etiópia, na África, é onde se localiza a única Usina WtE africana e não se encontram plantas em operação na Ásia Ocidental (UNEP, 2019).

A procura por alternativas de disposição adequada de resíduos sólidos urbanos é uma opção para a melhoria da sua gestão. No Brasil existe pouca utilização de tecnologias térmicas aplicadas ao tratamento de RSU.

Este trabalho foi realizado a partir de dados referentes a municípios situados no norte do estado do Tocantins, região conhecida como Bico do Papagaio, onde estudou-se as informações sobre os RSU de 10 cidades. Esta pesquisa foi desenvolvida para estudar a viabilidade econômica da implantação de uma planta de incineração de resíduos sólidos urbanos para pequenos municípios.

2 OBJETIVO GERAL

Estudar a viabilidade econômica da utilização de uma planta de incineração de resíduos sólidos urbanos aplicada a pequenos municípios.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Escolher para o estudo de caso uma região do estado do Tocantins e projetar a geração de RSU de pequenos municípios;
- Estimar a produção de energia gerada por meio de uma planta de incineração de resíduos sólidos urbanos proposta para o estudo de caso;
- Realizar a análise de viabilidade econômica do sistema proposto no estudo de caso.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

A biomassa pode ser definida como algum elemento orgânico que seja capaz de ser modificado para energia elétrica, mecânica ou térmica. Podendo ser agrupada conforme sua natureza em biomassa agrícola (cana-de-açúcar, soja, arroz e outros), rejeitos industriais e urbanos (como líquidos ou sólidos, assim como o lixo) e biomassa florestal. Os provenientes alcançados necessitam da matéria-prima utilizada (o qual seu potencial de energia oscila conforme sua constituição) como também da técnica do processo, conforme Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2008). A Biomassa é tida como uma das mais importantes possibilidades para a diversificação da base energética, observada a submissão em referência à utilização dos combustíveis fósseis. Sabe-se que os combustíveis fósseis geram apreensão devido ao fato de não serem renováveis (LIM et al., 2012).

Conforme Freire (2013), os atuais dispositivos para o tratamento destes rejeitos asseguram uma geração energética ambientalmente apropriada e com eficiência. É relevante destacar que é obrigatório o atendimento da normativa de eficácia do tratamento térmico, não podendo serem utilizados resíduos com baixa valoração energética agregada, mesmo que a especificação, conforme o poder calorífico inferior (PCI), não necessite ser considerada como permanente para definição do destino dos Resíduos Sólidos Urbanos. Desta maneira, temos que:

- A incineração não é viável tecnicamente para um $PCI < 1.675 \text{ Kcal/Kg}$, além de problemas técnicos, requer o uso de combustível auxiliar;
- Com um $1.675 \text{ Kcal/Kg} < PCI < 2.000 \text{ Kcal/Kg}$, a viabilidade técnica do processo de incineração necessitará de um pré-tratamento;
- Já para um $PCI > 2.000 \text{ Kcal/Kg}$, a queimação bruta (*massburning*) é tecnicamente viável.

O resíduo gerado pelas tarefas do ser humano é um dos mais sérios riscos à sua condição de vida. Isso tem definido um movimento em todo o planeta pela mitigação da produção, compreendendo-se que a geração e a venda de materiais gerem o mínimo aceitável de resíduos, reciclagem e reutilização de recipientes. No total, o replanejamento da concepção dos processos de produção de materiais é uma questão que escapa totalmente do controle dos municípios, que são somente os que têm a atribuição do gerenciamento e gestão dos resíduos sólidos. Entretanto, esses municípios podem e devem estimular a reciclagem, informando a

comunidade sobre essa política, organizando projetos de coleta seletiva e sustentando centros de triagem e reciclagem. Todavia, considerando que estes projetos tenham êxito, ainda assim mais de 65% dos resíduos produzidos, ou seja, a maior parcela produzida precisará de um destino final apropriado, sendo assim indispensável levar em consideração um caminho que abranja o seu aproveitamento energético (PASSINATO, 2008).

As mais importantes técnicas para o trato dos resíduos sólidos, junto com o aproveitamento de sua energia, são descritas como a combustão, gaseificação, incineração e plasma em função da sua reatividade com o agente gaseificador usado, além disso por produzir gases de alta densidade energética (CO, H₂). Esses gases são capazes de gerar combustíveis líquidos, logo a gaseificação de vapor de água pode ser considerada mais benéfica (SOARES et al., 2016).

A Lei n. 12.305 estabelece que pode ser realizado o uso de técnicas com o objetivo de se recuperar a energia contida nos resíduos sólidos urbanos, no caso de ter sido provada a sua exequibilidade no sentido técnico e ambiental e com a adoção de ações de acompanhamento da emissão de gases tóxicos (BRASIL, 2010).

A deterioração ambiental e a temática da segurança energética, em função das ações do ser humano, estão trazendo à tona uma apreensão no mundo todo. O irregular gerenciamento dos RSU colabora para essa deterioração. Os resíduos sólidos urbanos são gerados dia a dia no mundo inteiro. No ano de 2011, em todo o planeta, foram produzidos perto de dois bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos e esse número tende a crescer. Cabe ressaltar que esses resíduos sólidos podem ser considerados como uma imensa fonte renovável de potencial energético. Com um gerenciamento correto e um tratamento adequado dos RSU, existe a possibilidade da diminuição dos impactos ambientais e de se tirar proveito desta fonte potencial para a dissociação da base energética que existe por meio de usinas WtE e, concomitantemente, diminuir a quantidade de resíduos (AMOO; FAGBENLE, 2013).

3.1.1 Projeção da população futura

A população futura de uma localidade pode ser encontrada com a utilização da equação 1, segundo a Rede Interagencial de Informações para a Saúde (RIPSA, 2012).

População Futura:

$$PF = PA (1 + i)^n \quad (1)$$

Onde:

PA: População Atual;

PF: População Futura;

i: Taxa de crescimento médio populacional;

n: Tempo de crescimento populacional.

3.1.2 Potencial de recuperação energética da incineração de RSU

O potencial de recuperação de energia de resíduos sólidos urbanos é capaz de ser calculado pela equação 2 (OUDA et al., 2014):

$$ERP = W_{dry} \times LHV \times n \quad (2)$$

Onde:

ERP é o potencial de recuperação de energia (kWh);

W_{dry} é a massa seca de resíduo (kg);

LHV poder calorífico inferior da massa de resíduo (kWh);

n é o coeficiente de conversão energética de incineradores.

Baseado na potencial de recuperação de energia, a receita com a produção de eletricidade pode ser calculada com a equação 3:

$$E_{rev} = ET \times ERP \quad (3)$$

Onde:

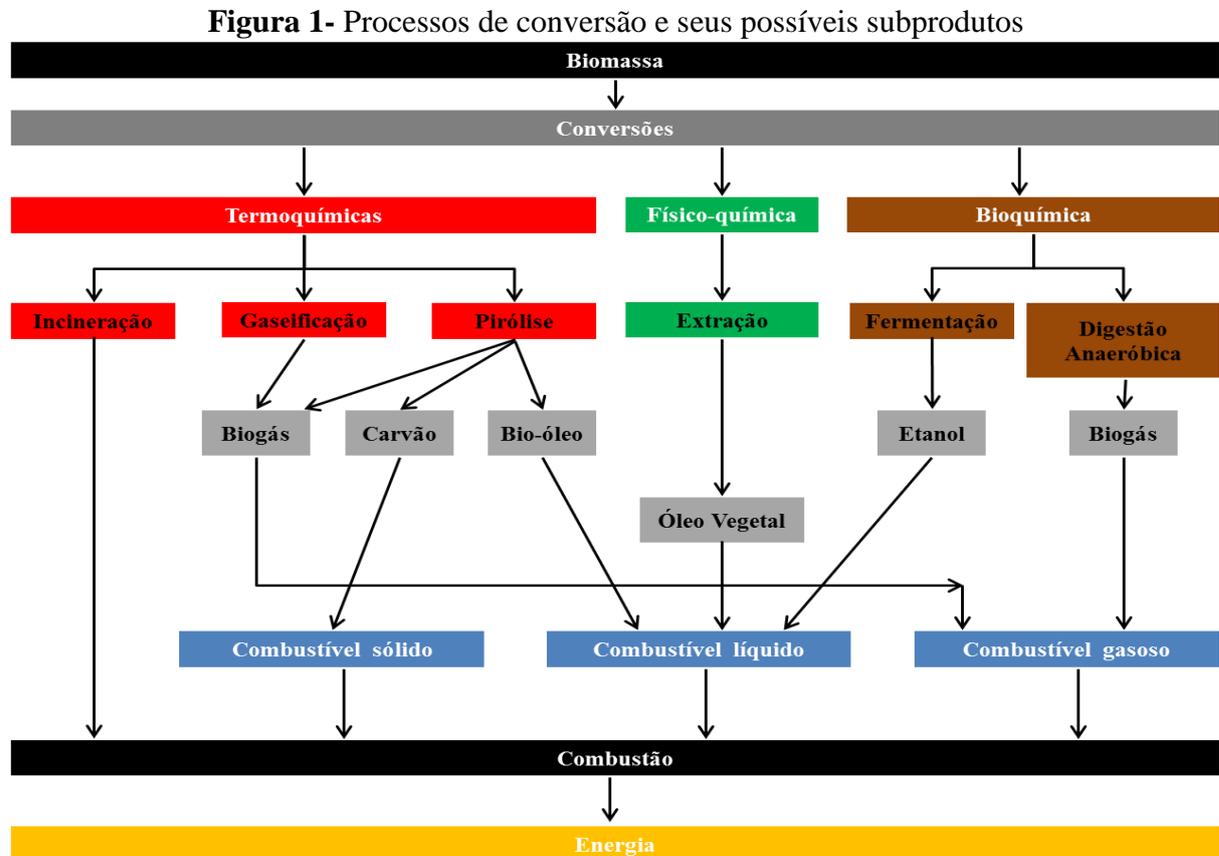
E_{rev} é a receita anual com de energia (kWh);

ET é a tarifa de energia (R\$/kWh);

ERP e o potencial de recuperação de energia (kWh).

Existem diversas maneiras de se transformar biomassa gerando uma gama de subprodutos.

A Figura 1 representa estas variadas técnicas e os produtos resultantes do seu processamento.



Fonte: adaptado de Barroso, 2016.

Através de processos termoquímicos como a pirólise, liquefação, gaseificação, combustão direta ou técnicas biológicas, como a fermentação e a digestão anaeróbia, consegue-se o aproveitamento de energia da biomassa.

Existem várias rotas capazes de serem percorridas com a finalidade de se realizar o aproveitamento da energia de resíduos sólidos urbanos, discute-se sobre quais são os caminhos tecnológicos opcionais e acessíveis a fim de se gerar energia elétrica por meio de RSU: pirólise, gaseificação e incineração.

3.2 INCINERAÇÃO

A incineração pode ser conceituada como a técnica de decomposição térmica de resíduos muito perigosos, submetendo-os a temperaturas acima de 1000°C, modificando-os em cinzas inativas. No decorrer deste procedimento de incineração, as cinzas têm seu volume diminuído, sendo posteriormente colocadas em aterros adequados e os gases produzidos no processo são tratados de forma apropriada. É a técnica mais conveniente para se tratar resíduos originários dos serviços de saúde (KHIARI et al., 2004).

O processo de incineração é capaz de gerar até 550 kWh/t de resíduo. Tendo em vista a possibilidade de diminuição na transmissão de até 5% da totalidade do que foi gerado, este número passa a ser em torno de 523 kWh/t (EPA, 2002 apud MORGADO; FERREIRA, 2006a).

O processo de incineração promove a redução na média de 92% do volume de resíduos a serem dispostos nos aterros sanitários e, por suas características energéticas, assegura uma parcela quase que constante de energia térmica sendo capaz de ser transformada em energia elétrica. Em vista disso, encontram-se na atualidade em torno de 650 usinas que fazem o uso dos gases quentes em caldeira para a recuperação ligada a uma turbina de vapor (EPE, 2014). Destaca-se que a geração de 500 t/dia de RSU é capaz de suprir uma unidade de incineração com uma potência de 11,7 MW. Este modelo possui uma eficiência de conversão elétrica de 20% (EPE, 2014).

Quando a técnica de aproveitamento energético, por meio da incineração de resíduos, é considerada como opção, tornar-se essencial o reconhecimento da necessidade de implementação de políticas de diminuição de resíduo, em que se necessita conscientizar a população sobre a promoção, valoração e reuso dos resíduos, oportunizando a coleta seletiva e a reciclagem. Também se recomenda fazer uso de táticas de beneficiamento do biogás de aterros sanitários, como também a produção de energia por meio de incineração, no momento em que o material esteja no estado seco e desagregado (DIAS; PENA, 2016).

Todavia, Lundin et al. (2004) consideram que um dos pontos vantajosos da incineração dos resíduos de origem urbana é a alternativa de reutilização dos constituintes ou também da energia reservada na biomassa. Essa energia é capaz de gerar eletricidade e calor substituindo as demais fontes de energia, como por exemplo: gás natural ou óleo combustível. A energia formada consegue ser empregada no mesmo processo, diminuindo o custo de

operação da ação. Conforme os autores, os recursos resultantes do aproveitamento energético equivalem a 11% das despesas desta alternativa operacional.

Hoje em dia, o processo de incineração é usado apenas para a problemática da acomodação final dos resíduos considerados perigosos e uma parcela dos resíduos hospitalares, contudo demonstra grande capacidade de ser empregada para variados resíduos. Sendo assim, considerando os resíduos sólidos urbanos, a incineração é uma possibilidade que deve ser levada em conta, em decorrência da sua elevada produção (BERGAMASCHI; PANDOLFI; MARCELLINO, 2016).

A queima do lixo é definida como o modelo de maior eficácia para acabar com os lançamentos de metano, no caso dos RSU ter sido disposto em aterros, além da substituição da geração de energia com base em combustíveis de origem fóssil (POLETTTO, 2008).

A Usina Verde, situada no Rio de Janeiro, é considerada como um exemplo de uso do método de incineração para a finalidade de produção de energia. O incinerador existente ali é capaz de fazer o tratamento de trinta toneladas de resíduo sólido diariamente, gerando 0,7 MW de energia elétrica (SANTOS, 2009).

Entre as outras características dos RSU, o teor de umidade possivelmente seja a que mostre um superior número de aspectos capazes de interferir no seu valor e que necessita, entre outras coisas, na sua constituição inicial, situação climática de operacionalização de aterros, eficácia dos mecanismos de recolhimento dos percolados e barreiras impermeáveis (NASCIMENTO, 2007).

Variadas técnicas estão sendo pesquisadas com a finalidade de se recuperar diversas substâncias importantes ao longo do processo de incineração. Uma dessas técnicas faz o uso do ácido sulfúrico com a finalidade de dissolução do fósforo presente na matéria orgânica, para que depois possa ser restaurado. A técnica necessita de uma quantia alta de produtos químicos, Todavia, não somente o fósforo, mas também metais pesados conseguem ser restaurados passando depois por tratamento individualizado ou mesmo acomodação em aterros destinados à resíduos perigosos. A potencialidade desta opção fez com que o governo da Suécia estabeleça-se como propósito até 2010, a restauração de no mínimo 75% do fósforo presente nos biossólidos gerados pelo seu país (LUNDIN et al., 2004).

Utilizada para diminuir o volume do lodo do esgoto, a incineração é considerada uma técnica eficiente. No momento em que aliada à cogeração, ela é capaz de reaver uma enorme fração de energia presente no solo. Todavia, os lançamentos de gases tóxicos são a desvantagem fundamental dessa técnica de se tratar o lodo do esgoto (VIEIRA et al., 2011).

No decorrer do processo de incineração do lodo, no início, a massa é diminuída no máximo 5 vezes, sobejando só sólidos fixos. Costumeiramente, essa possibilidade é utilizada na medida em que a contaminação do lodo é bastante elevada, ou no momento em que existem poucas áreas apropriadas para a efetivação de outras opções. Além da sua capacidade de poluir a atmosfera, a incineração de biossólidos necessita de altos gastos com filtros para que possa reter os gases tóxicos produzidos por ela (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

Na atualidade, encontram-se variadas maneiras para se realizar o tratamento dos resíduos sólidos urbanos com diferenciadas técnicas, entre elas: tratamento com micro-ondas, compostagem, plasma-pirólise, reciclagem e incineração. Acredita-se que o tratamento por meio da incineração reduz a quantidade dos resíduos em aproximadamente 90% e o seu peso em torno de 15%, tendo ainda a cogeração de energia como uma das mais relevantes vantagens em seu processo (MORGADO; FERREIRA, 2006a).

Conforme Morgado e Ferreira (2006b, p. 6), a técnica de incineração constitui-se de maneira geral em duas etapas sintetizadas a seguir:

Inicialmente, o resíduo é queimado na câmara primária, que é a receptora direta do lixo, em uma temperatura suficientemente alta para que algumas substâncias presentes se tornem gases e outra assumam a forma de pequenas partículas. Nesse dispositivo, a temperatura de operação varia tipicamente entre 500°C e 900°C. Já a fase gasosa gerada na câmara primária é encaminhada para a câmara secundária. Essa mistura de gases e partículas é então queimada a uma temperatura mais alta por um intervalo de tempo suficiente para que haja a combustão completa. Nesse caso, a atmosfera é altamente oxidante (excesso de oxigênio) e a temperatura de projeto varia normalmente entre 750°C -1250°C. Os diversos gases gerados na câmara anterior são oxidados a CO₂ e H₂O.

Os gases provenientes desta segunda etapa passam por um sistema de abatimento de poluição, que consiste em muitos estágios (por exemplo, scrubber para a remoção de ácido no gás, precipitador eletrostático para a remoção de poeira e/ou filtros para a remoção de partículas finas), antes de serem enviadas para a atmosfera via uma chaminé. As restritas regulamentações de emissões algumas vezes requerem o uso de carvão ativo no sistema de abatimento, para que haja redução da emissão de mercúrio e dioxinas (MORGADO; FERREIRA, 2006b, p. 6).

De acordo com a World Health Organization (WHO, 2007), ainda que pouco usual no Brasil, a incineração de resíduos apresenta perigos à saúde das pessoas na medida em que gera uma quantidade diversificada de compostos tóxicos, tais como metais pesados, gases, partículas, compostos orgânicos, furanos e dioxinas lançadas na atmosfera.

Entre as vantagens do processo de incineração de resíduos, evidenciam-se: a diminuição da porção requisitada para acomodação em aterros; o restabelecimento da energia

no período de combustão, conseguindo ser utilizada para a geração de energia elétrica ou até junto com energia e calor.

Isso leva à troca dos modelos habituais de energia e acaba com os lançamentos de gases oriundos dos pontos de geração de energia a partir de hidrocarbonetos, além da recuperação de uma enorme quantidade de energia presente nos resíduos, uma vez que se os resíduos tivessem sido dispostos em um aterro e se ocorresse à recuperação da energia do gás proveniente de aterro, impedir-se-ia o lançamento de metano (poderoso gás estufa) que seria capaz de se expandir em decorrência da acomodação de lixo em aterro sem a sua recuperação (DIAS; PENA, 2016).

Vale enfatizar que para uma melhor reutilização do gás de metano, é preciso realizar a coleta seletiva. Em função do volume do lixo no Brasil ter enormes taxas de umidade oscilando entre 40% e 60%, se aterrasse somente a porção úmida, se teria como resultado efetivo e vasto o metano. Por outro lado, se os elementos secos tivessem sido separados se alcançaria grande efetividade na queimação de elementos combustíveis (DIAS; PENA, 2016).

Existem ainda outras vantagens da incineração como o aspecto econômico da reutilização dos resíduos, quando mostra que governos e iniciativa privada lucram, na medida em que a indústria lucraria três vezes, pois: 1) conseguiria ter uma possibilidade alternativa e constante de fornecimento de energia; 2) uma alternativa a mais para a acomodação dos resíduos que não causam perigo e que são produzidos por elas; 3) complementarmente obteria lucros provenientes dessa inovação na produção de energia e acomodação dos resíduos. Os municípios economizariam ainda mais, na medida em que as despesas para implementação e operacionalização dos aterros sanitários ficariam perto de não existir na sua totalidade, os percursos realizados pelos caminhões de coleta seriam diminuídos, e ainda ocorreria uma melhora no trânsito, sendo que este procedimento seria capaz, ainda, de incluir as cooperações público-privadas, proporcionando uma redução nos custos do gerenciamento dos resíduos sólidos para os municípios (QUEZADO, 2010).

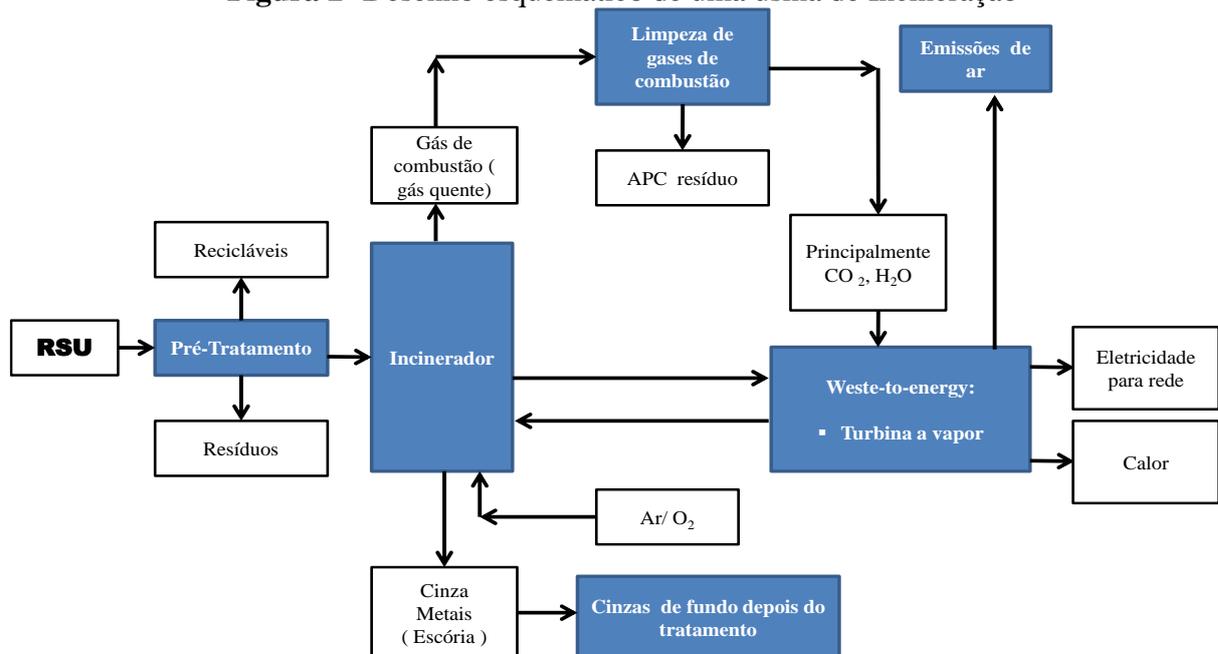
Segundo o alerta do Greenpeace (2011), com relação às desvantagens do processo de incineração, “populações próximas a incineradores estão potencialmente expostas a certos compostos através da inalação do ar ou consumo de produtos agrícolas contaminados (como legumes, ovos e leite)”, essa contaminação pode ocorrer, também, por meio do toque da pele junto ao solo contaminado.

Os primordiais objetivos do processo de incineração são: eliminar a patogenicidade ou a periculosidade dos resíduos, diminuir expressivamente a massa e volume dos resíduos sólidos urbanos com a finalidade de fazer a sua disposição final e produzir eletricidade.

Encontram-se, fundamentalmente, modelos de procedimentos de incineração para os RSU em nível comercial: queima em câmaras múltiplas; queima em grelha; queima em corpo rotativo e queima em leito fluidizado (PARO; COSTA; COELHO, 2008).

Segundo Freire (2013), em um planejamento governamental para implementação de uma planta de incineração, a fase de viabilidade do projeto é constituída pelas etapas de pré-estudo de viabilidade, decisões políticas, estudo de viabilidade e novas decisões políticas. A Figura 2 apresenta a ilustração de uma usina de incineração de resíduos sólidos urbanos.

Figura 2- Desenho esquemático de uma usina de Incineração



Fonte: adaptado de Bosmans et al. (2013).

O processo de incineração dos RSU descrito na Figura 2 faz parte de um trabalho de revisão, no qual o autor descreve como sendo importante o estágio em que se encontram as tecnologias térmicas, neste caso a incineração, para que se possa valorar o resíduo como um produto ou como energia. Neste processo ocorre primeiro a segregação dos recicláveis e dos orgânicos que, posteriormente, são encaminhados ao incinerador onde passam por aquecimento gerando assim subprodutos como cinzas, metais e escórias e também gás de combustão, que agregado a turbinas a vapor, podem gerar calor, energia e emissões de ar (BOSMANS, et al., 2013).

A energia gerada por meio da técnica de incineração de resíduos sólidos urbanos é capaz de gerar uma energia em média para 15% da população que o produz. O potencial de

viabilidade energética foi comprovado somente para contextos de taxas de vendas desta energia mais elevadas dos que as praticadas atualmente no Brasil. Esses dados mostram que se faz necessária a intervenção governamental para viabilização econômica desta técnica o que diminuiria a acomodação inapropriada e o desperdício (SILVA, et al., 2020)

Em um estudo realizado na cidade de São José dos Campos-SP que possui uma população de mais de 500.000 habitantes, realizou-se uma análise econômica de uma planta para incineração de RSU. Este estudo apresentou valores dos parâmetros estudados como o investimento inicial de U\$\$ 54.319.000 e VPL – U\$\$ -26.056.000. Na parte de potencial energético, a planta mostrou os seguintes dados técnicos: 9766 kW de potência, e geração de energia ao ano em torno de 68.439 GW com capacidade de incineração de 210.330 ton./ano de RSU a partir de 2017 (SANTOS et al., 2019)

Na pesquisa realizada na Colômbia, na cidade de Pasto, foi considerada uma população igual a 440.040 com uma projeção da taxa de crescimento para os anos de 2019 e 2020 em 0,7%.

O incinerador estudado era do tipo de leito fluidizado, com capacidade de tratar 2.420.000 toneladas de RSU e teve um investimento inicial de \$19,5 MUSD e taxa interna de retorno (TIR) 8,53. O Custo Nivelado da Eletricidade LOCOE foi de \$ 38 USD/MWh e a quantidade de energia recuperada 130,67 e 132,1 MWh/dia com NPV (Net Present Value) de \$5.605.000 MUSD. Já o valor das emissões evitadas ficou em 1.014.691 toneladas CO₂ e o custo de investimento por tonelada de resíduo em \$ 62,20 USD/t (ARIAS-ALZATE et al, 2018).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) lançou recentemente a Normativa Brasileira (NBR 16849), que estabelece diretrizes e requisitos do preparo dos Resíduos Sólidos Urbanos para fins de Recuperação Energética (RSUE), com ou sem a introdução de até outros resíduos da classe II, englobando conceitos de elegibilidade, registro, rastreabilidade, amostragem, criação de lotes, armazenagem, preparação, classificação dos lotes produzidos de acordo com a cadeia de custódia, considerando a hierarquização da gestão dos resíduos bem como a relação com as questões ambientais.

A classe dos RSUE exige o atendimento dos limites de valores de três aspectos do resíduo, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1- Limites para classificação dos RSUE

Características de Classificação				
Unidade	Medida estatística	Classes		
	PCI (base seca)	P1	P2	P3
Kcal/kg	Limite inferior da média ($P \geq 95\%$)	$PCI \geq 4750$	$4750 > PCI \geq 3580$	$3580 > PCI \geq 2390$
	Teor de Cloro	C1	C2	C3
%	Limite superior da média ($P \geq 95\%$)	$CI \leq 0,5$	$0,5 < CI \leq 1,5$	$1,5 < CI \leq 3,0$
	Teor de Mercúrio	H1	H2	H3
mg/kg	Média Aritmética	$Hg \leq 0,1$	$0,1 < Hg \leq 0,25$	$0,25 < Hg \leq 0,5$
	Percentil de 80	$Hg_{P80} \leq 0,2$	$0,2 < Hg_{P80} \leq 0,5$	$0,5 < Hg_{P80} \leq 1$

Fonte: (NBR 16849, 2020).

De acordo com a NBR 16849 (2020), os valores de limites utilizados na Tabela 1 baseiam-se em operações estatísticas resultantes de análises das três características conforme detalhado a seguir:

- PCI na base seca: operação realizada desde o limite inferior da média aritmética a um intervalo de confiabilidade de 95%;
- Quantidade de cloro: operação realizada desde o limite superior da média aritmética, a um intervalo de confiabilidade de 95 %;
- Quantidade de mercúrio: operação realizada desde o limite da média aritmética e o percentil 80 do grupo de amostras, tendo que a classe que será escolhida vai ser a de valor superior achado entre os dois parâmetros.

Uma pesquisa realizada com a incineração de 150 ton./dia de RSU mostrou no cenário S-1 que esta tecnologia foi capaz de recuperar 12.2 kWh/ t de energia com uma eficiência de 13,2 %, sem a separação de plástico e papel. O aumento da eficiência é relativamente menor com o aumento da separação de plástico e papel, já o custo do processo diminui com a separação de plástico e papel e a baixa densidade da população influencia no aumento do custo de tratamento. O PCI e a quantidade de resíduos a ser tratada exercem influência relevante na recuperação de energia (OHNISHI et al., 2018).

3.3 UMIDADE DOS RSU

Pesquisas realizadas no Centro Universitário de Sete Lagoas UNIFEMM apresentaram as características dos RSU daquela instituição. Os dados levantados mostraram alguns parâmetros dos resíduos gerados por ela, dentre eles, o teor de umidade, apresentaram um valor médio de 60,45% (MOREIRA et al., 2019).

3.4 COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

As leis de Portugal impõem possibilidades apropriadas à disposição de RSU. Os rejeitos orgânicos de resíduos sólidos urbanos possuem grande potencial para serem empregados como Combustível Derivado de Resíduos (CDR), sobretudo se forem misturados a outros elementos de melhor valor de aquecimento com o objetivo de se conseguir pellets de CDR com boa característica de combustão, densidade e armazenagem (BRÁS et al., 2017).

Amostras de rejeitos de tratamentos mecânicos (triagem) e biológicos (compostagem) de RSU na cidade de Isfahan, no Iran, mostraram que os CDR gerados a partir destes processos são capazes de serem classificados com poder calorífico 3, Cl 1 e Hg 1, em conformidade com o Comitê Europeu de Normalização (Norma CEN). Tendo como base as quantidades geradas de 300 ton./dia (resíduo triagem) e 120 ton./dia (resíduos compostagem) se poderia obter uma economia de 2 milhões de GJ/ano, estes dados demonstraram que os CDR são capazes de serem uma fonte alternativa de energia para as indústrias de cimento diminuindo a poluição e contribuindo para melhoria na gestão dos resíduos. O teor de cloro é um parâmetro que preocupa os fabricantes de cimento, pois em dependendo da quantidade pode provocar o entupimento dos fornos (SHUMAL et al., 2020).

A Secretaria de Estado e Meio Ambiente de São Paulo (SMA), por meio da resolução nº 38 de 2017, estabeleceu diretrizes e condicionantes para que seja realizado o licenciamento e a operação da atividade de recuperação de energia derivadas do emprego de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos (CDRU) nos Fornos de Produção de Clínquer.

Esta resolução define que os CDRU deverão ter características mínimas, condições operacionais, limites de emissão, critérios de controle e monitoramento para disciplinar o licenciamento ambiental da recuperação energética de CDRU nos fornos de produção de clínquer, com a finalidade de atendimento do parâmetro da melhor tecnologia real disponível, de maneira a mitigar os impactos mórbidos à saúde pública e ao meio ambiente (SMA, 2017).

- I - Poder Calorífico Inferior: ≥ 3583 kcal/kg na base seca;
- II - Taxa de Cloro: $\leq 1,0$ %;
- III - Taxa de Mercúrio: $\leq 0,5$ mg/kg.

Esta norma determina que para que um resíduo industrial possa ser considerado apto a ser utilizado como CDRU, ele precisará atender entre outros os seguintes requisitos:

- I - Ter PCI igual ou maior do que 2.775 kcal/kg, base seca;
- II – Estar na Relação de resíduos não perigosos mostrada no Anexo I desta Resolução (oriunda da Listagem Brasileira de Resíduos Sólidos da Instrução Normativa nº13, de 18 de dezembro de 2012, do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA).

A Secretaria de Estado de Infraestrutura e Meio Ambiente de São Paulo (SIMA) por meio da resolução nº 47 de 2020, definiu procedimentos e requisitos de operação, limites de emissão, padrões de controle e monitoramento para disciplinar o licenciamento ambiental dos procedimentos de preparo e de recuperação de energia de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos – CDR para o cumprimento dos parâmetros da mais satisfatória tecnologia prática à disposição de maneira a reduzir os impactos maléficos à saúde pública e ao meio ambiente e que só serão levados em consideração resíduos que possam substituir o combustível convencional, uma vez que cumpram concomitantemente as seguintes condições:

- Tenha passado por algum método preliminar de separação dos resíduos recicláveis com objetivo de atender o art. 9º da Política Nacional de Resíduos Sólidos;
- Comprovação dos ganhos com a energia;
- As circunstâncias da preparação e do uso do CDR garantam o atendimento das normas e parâmetros da Resolução.

Acredita-se que a utilização do CDR seja uma maneira apropriada de destinação final dos resíduos sólido de preferência menor que a reciclagem e maior que o tratamento (SIMA, 2020).

3.5 COGERAÇÃO DE ENERGIA

A expressão cogeração de energia tem fundamentalmente como definição a geração simultaneamente e em sequência de duas maneiras de energia, através de somente uma matéria-prima energética. O processo de cogeração de energia constitui-se de uma tecnologia

para a geração simultânea de dois tipos de energia, uma na forma térmica e a outra do tipo mecânico-elétrica com base na combustão de somente um combustível (BARBELI, 2015).

Conforme Barbeli (2015), os mecanismos de cogeração empregam algumas especificações para a escolha das tecnologias que serão utilizadas como:

- Avaliação de impactos ao meio ambiente, em decorrência do combustível que será empregado;
- O combustível estar disponível deve ser levado em conta, conforme a técnica e o pequeno custo;
- Pesquisa sobre a eficiência em se converter o combustível em eletricidade;
- Valor do investimento essencial para conservação e operacionalização;
- Credibilidade do complexo elétrico.

Conforme Santos (2017), os sistemas de cogeração mostram inúmeros benefícios, são eles:

- Incremento da eficiência e rendimento energético;
- Confiança superior no sistema;
- Mais baixo impacto ao meio ambiente e diminuição nos lançamentos de contaminantes na atmosfera;
- Racionamento nas aplicações da área em sistemas para transmissão e distribuição;
- Diminuição das perdas em redes.

A especificação dos sistemas de cogeração é realizada levando em consideração o ordenamento relativo da produção de potência e do calor, sendo que os ciclos são capazes de serem do tipo *Topping* e *Bottoming* (SANTOS, 2017).

As séries *Topping* são o formato mais usado na técnica de cogeração, nelas os gases provenientes da queima ao tornarem-se incorporados em altas temperaturas, são empregados na produção de eletricidade e também de energia mecânica. Com a finalidade de se produzir energia, seja ela mecânica ou elétrica, a princípio faz-se a queima do combustível em um equipamento térmico e o calor que não teve aproveitamento no processo é utilizado no formato de calor útil para atendimento das exigências da energia térmica. Assim, primeiramente, se gera a energia e na sequência é realizada a recuperação do calor que então é disponibilizado no formato de vapor ao processo. O calor disponibilizado é capaz de ser usado em inúmeros processos com a finalidade de aquecimento e refrigeração. Mecanismos de turbinas a vapor ou a gás, e também em associação, empregam muito este formato (BARBELI, 2015).

Segundo Neto (2001), a recuperação direta de calor no formato *Bottoming* é aplicada para a geração de energia elétrica, mecânica e também a vapor. Nesta situação, o calor renunciado por meio dos gases de exaustão oriundos das transformações químicas em equipamentos térmicos a altas temperaturas em processamentos industriais tem seu aproveitamento em caldeiras de recuperação com o objetivo de produzir vapor, que é utilizado como um líquido para ligar um turbo gerador, se fazendo gerar energia mecânica. O formato *bottoming* é empregado em turbinas a vapor com condensação ou contrapressão.

3.6 VIABILIDADE ECONÔMICA

De acordo com Gutberlet (2011), maiores gastos com aterros têm gerado um aumento na procura por inovações para o tratamento de resíduos sólidos urbanos. Dentre as alternativas está a incineração dos resíduos como finalidade acessória para a produção de energia. A incineração renasce, portanto, como uma tecnologia limpa com o objetivo de se tratar os resíduos. Em 2009, no decorrer do fórum econômico mundial, apontou-se a incineração como uma categoria em ascensão (LIEBREICH et al., 2009 apud GUTBERLET, 2011), sendo referenciada como uma opção econômica e de eficiência, esclarecida pelo fundamento de não precisar de muita força de trabalho e conceber créditos de carbono, circunstância que causa conflito entre os que defendem essa técnica e os protetores do meio ambiente.

A técnica de projeto de incineradores de que se tem acesso é capaz de se fazer a previsão da produção de até mesmo 0,95 kWh/t que passaram por processamento, sendo que a maior parte dos projetos implementados conseguem produzir 0,4 a 0,95 kWh/t. Simplesmente, essa produção está sujeita à força do potencial calorífico dos resíduos sólidos urbanos que forem processados (MENEZES, GERLACH, MENEZES, 2000).

O emprego do fluxo de caixa de um projeto proporciona variadas análises econômicas e financeiras, possibilitando a avaliação da viabilidade econômica de projetos e a resposta ao investimento. Os mais importantes índices utilizados para se avaliar economicamente um projeto são: o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o tempo de retorno do Investimento (Payback) (OLIVEIRA, 2014).

3.6.1 Valor presente líquido (VPL)

Valor presente líquido (VPL), em inglês *Net Present Value* (NPV), é uma das ferramentas mais refinadas quando adotadas para se apreciar alternativas de aplicações de capitais. Representa a riqueza em recursos financeiros da aplicação mensurada pela diferenciação que ocorre entre a quantia atual que entra no caixa e a quantia atual que sai do caixa, a uma definida tarifa de desconto. O VPL pode ser alcançado por meio da equação 4 (KASSAI et al., 2000).

$$VPL = \frac{FC0}{(1+i)^0} + \frac{FC1}{(1+i)^1} + \frac{FC2}{(1+i)^2} + \frac{FC3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{FCn}{(1+i)^n} \quad (4)$$

Em que:

- FC = Fluxos de caixa esperados (positivos ou negativos);
- i = Taxa de atratividade (desconto).

É considerado atrativo todo investimento que mostre um VPL maior ou igual à zero. De acordo com Kassai et al (2000), esta definição é imensamente útil nos cálculos que contenham transações com valor em numerário de poder aquisitivo distinto e possui, além disso, uma enorme compatibilidade com o fundamento contábil do denominador habitual monetário. Não há como “somar” quantias que não se encontrem em moeda equivalente. Se isto acontecer, os valores precisarão previamente ser acertados ao valor atual.

3.6.2 Taxa interna de retorno (TIR)

Taxa Interna de Retorno (TIR), em inglês, *Internal Rate of Return* – IRR, é considerada uma das maneiras mais aprimoradas de se apreciar alternativas de aplicações de capitais. Ela retrata o índice de desconto que nivela, em um só instante, os movimentos de entrada no caixa com a sua saída (KASSAI et al., 2000). A TIR pode ser obtida pela equação 5.

$$0 = \frac{FC0}{(1+TIR)^0} + \frac{FC1}{(1+TIR)^1} + \frac{FC2}{(1+TIR)^2} + \dots + \frac{FCn}{(1+TIR)^n} \quad (5)$$

Em que:

- FC = Fluxos de caixa esperados (positivos ou negativos);

- i = Taxa de atratividade (desconto).

É tido como economicamente interessante todo investimento que mostre TIR maior ou igual à Taxa Mínima de Atratividade (TMA). A TIR é calculada segundo um fluxo de caixa descontando, e a uma definida taxa de atração. A TIR será atrativa na medida em que for maior ou igual a zero (KASSAI et al., 2000).

3.6.3 Tempo de retorno do investimento (Payback)

O payback é definido como o tempo necessário para se reaver um investimento, e fundamenta-se no reconhecimento do período em que o volume do desembolso de capital executado assim seja recuperado através de movimentações líquidas de caixa produzidas pela aplicação. É o tempo em que recursos investidos (movimentações negativas) se invalidam com os seus correspondentes recursos de caixa (fluxos positivos) (KASSAI et al., 2000).

3.7 CRÉDITOS DE CARBONO

Em uma pesquisa realizada nas cidades de Abuja e Lagos, na Nigéria, após a retirada de uma parcela significativa do material reciclável, verificou-se características de uma planta WtE de incineração de RSU. Baseado na coleta realizada nestas duas cidades, esta tecnologia térmica apresentou um nível de produção de energia de 800 kWh/t de RSU, com capacidade de produção energética de 54 GWh e 475 GWh ao ano, quantidade necessária para atender 11.000 e 94.000 residências. Ainda como consequência, a planta promoveu, ainda, a diminuição das emissões em 324 milhões 2.835 milhões de kg CO₂ e ganho nas Reduções Certificadas de Emissão (RCE) de US \$ 7 milhões e US \$ 113 milhões ao ano (BAKER; UNAEGBU, 2019).

A recuperação energética de RSU, na Malásia, com o emprego da incineração possui um grande potencial. É previsto, para o ano de 2020, que um incinerador possa fornecer 6,840 milhões de Ringgit malaio (RM) por ano com comércio da energia e 320 milhões de RM com os créditos de carbono. Atualmente, a geração de eletricidade é inferior a 20MW/ dia (BASHIR et al., 2019).

A produção de energia, através do RSU, se comparada com as Usinas Termelétricas (UTE) movidas a gás natural, é menos capaz de produzir eletricidade, entretanto a diminuição na produção de energia e a elevação do investimento em Usinas Termelétricas Híbridas

(UTH) são capazes de serem mitigados pelo comércio de créditos do carbono. As investigações realizadas a respeito do aproveitamento da energia de sobras de alimentos presentes nos resíduos urbanos em Usinas Termelétricas Híbridas (UTH), que fazem o uso de gás natural na medida de 80% a 90% e resíduo urbano de 10% a 20%, mostrou que estas usinas em um curto período serão mais atrativas do que as usinas tocadas a gás natural. Esta previsão foi baseada nas variações dos valores dos combustíveis fósseis, nas oscilações do comércio e nos ganhos complementares provenientes do comércio dos certificados de emissões de carbono decorrentes da diminuição dos lançamentos de gases causadores do efeito estufa (OLIVEIRA; ROSA, 2002).

Nas cidades, o uso do lixo com a finalidade de se produzir energia está tendo cada vez mais ênfase. Essa maneira de gerar energia tem sido utilizada por diversos países, incluindo diversos estados brasileiros em virtude dos seus benefícios e relevância. E mostra-se como mais uma alternativa de energia, e com perspectiva de agregação de valor aos materiais orgânicos e inorgânicos presentes no lixo, sendo possível o seu uso para a geração de energia e recursos, quer seja na negociação dos créditos de carbono como também no controle de gastos com a energia proveniente de combustíveis fósseis, conforme os procedimentos do Protocolo de Kyoto e de outros mercados de outros países (SANTOS, 2009).

O protocolo de Kyoto tem como finalidade a diminuição do lançamento de gases de efeito estufa, e um dos quatro meios utilizados para realizar este objetivo são os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), que têm como propósito conter os lançamentos de gases poluidores aos países desenvolvidos e dar suporte a programas que favoreçam os países em desenvolvimento na questão da sustentabilidade (SANTOS, 2009).

Os programas precisam ser capazes de promover a diminuição dos gases poluentes, elevar a retirada dos gases que já se encontram ali na atmosfera, ação conhecida como o “sequestro do carbono”. Os programas de reflorestamento têm como propósito ampliar a retirada dos gases causadores do efeito estufa (GEE) visto que as florestas ampliam a absorvência de CO₂ que já se encontra na atmosfera. Qualquer tonelada de gases poluentes da atmosfera que não mais for lançado ou absorvido da atmosfera conseguirá ser ganha pelos países desenvolvidos por meio do Mercado Mundial de Reduções Certificadas de Emissão (RCE), ou com os créditos de carbono no Mercado de Kyoto (ICLEI, 2005 apud SANTOS, 2009).

Uma planta de incineração de resíduos sólidos na França é capaz de recuperar 600 kWh/t de RSU, o que corresponde a uma eficiência líquida de 23%. Levando-se em consideração que foram incinerados 14,5 milhões de toneladas de RSU, em 2012, esse

número corresponde a uma redução de 2,7 milhões de toneladas de emissões de CO₂. A gestão local dos resíduos, em particular com relação ao poder calorífico dos RSU, e o controle das emissões são aspectos fundamentais para o desempenho da planta. A emissão do CO₂ tem ligação com a constituição dos resíduos, característica do carbono fóssil (DONG et al., 2018).

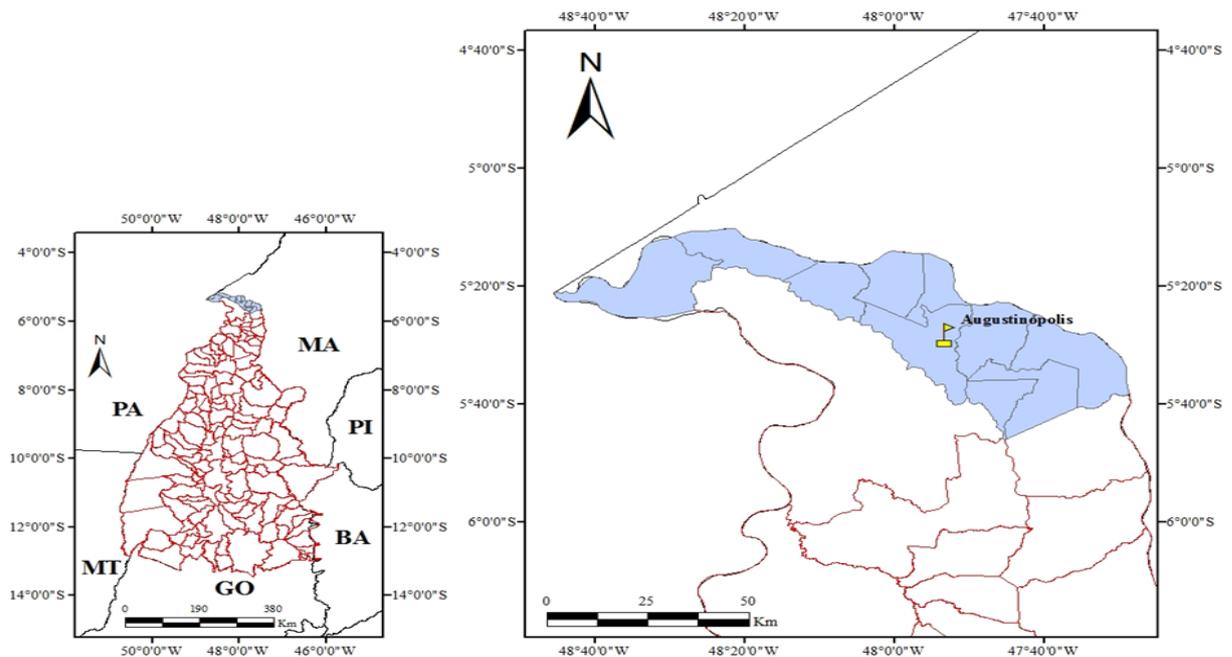
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os locais escolhidos como cenários para esta pesquisa foram 10 municípios da região norte do Estado do Tocantins: Augustinópolis; Axixá do Tocantins; Buriti do Tocantins; Carrasco Bonito; Esperantina; Praia Norte; Sampaio; São Miguel do Tocantins; São Sebastião do Tocantins e Sítio Novo.

Esta região foi escolhida devido ao fato de os resíduos das suas cidades possuírem características gravimétricas que os diferencia de outros municípios com populações maiores que 50.000 habitantes. Conforme a Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMARH, 2016), os municípios possuem boa estrutura rodoviária que contribui para a logística de transporte e estão localizados em distâncias relativamente pequenas e equidistantes de Augustinópolis, local sugerido como sede para instalação da planta.

Augustinópolis fica na mesorregião ocidental do Estado do Tocantins, coordenadas Universal Transversa Mercator (UTM) 180068.35 e 9394722.89 S. Um mapa da área destas cidades e com a localização de Augustinópolis foi realizado com base em dados da Secretaria da Fazenda e Planejamento (SEFAZ, 2012), conforme verifica-se na Figura 3.

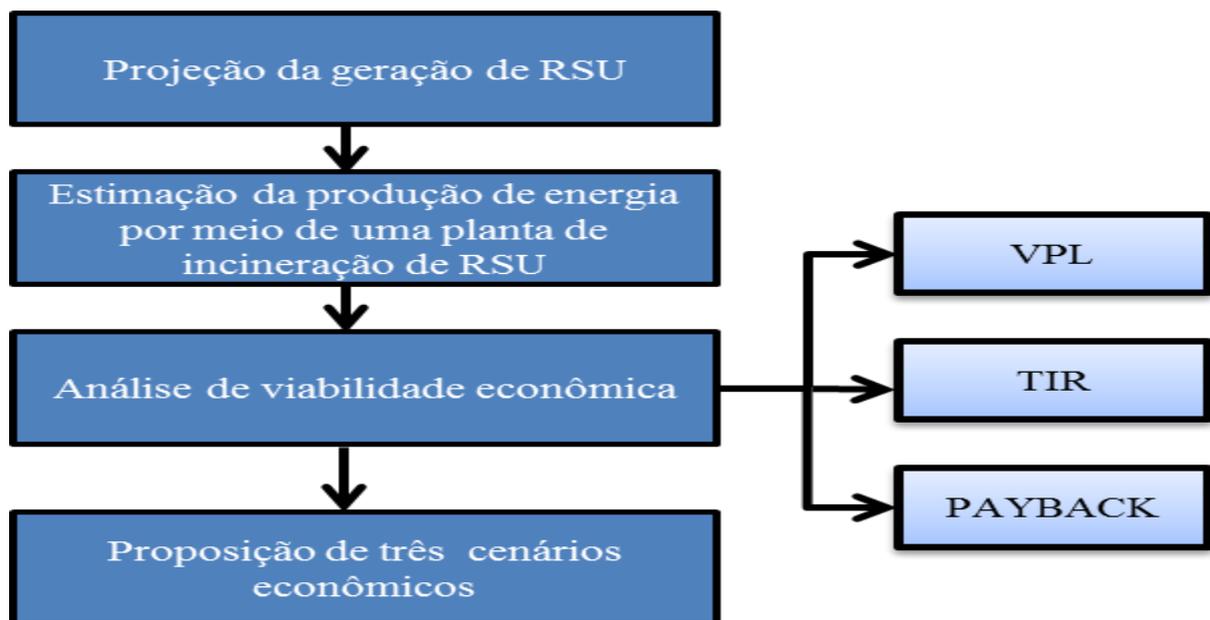
Figura 3- Mapa de localização da cidade de Augustinópolis



Fonte: Autor

Distante 682 km da capital Palmas, Augustinópolis possui uma população estimada em 18.412 habitantes (IBGE, 2019), é entre todos os municípios adotados como cenário desta pesquisa o que mais gera resíduos e possui um aterro sanitário que se encontra com suas obras inacabadas. O esquema apresentado na Figura 4 mostra, detalhadamente, as etapas deste trabalho, buscando oferecer uma melhor compreensão das metodologias aplicadas.

Figura 4- Esquema das etapas de trabalho



Fonte: Autor

4.1 PROJEÇÃO DA GERAÇÃO DE RSU DE PEQUENOS MUNICÍPIOS.

A projeção do cálculo da geração de RSU para os municípios foi realizada com base nas estimativas médias de crescimento da população dos municípios estudados (IBGE, 2019); (IBGE, 2010); no ajuste da taxa de crescimento da população do Tocantins (IBGE, 2013) e no valor *per capita* de geração de resíduos, considerado 0,5 kg/hab./dia (SEMARH, 2016). Para o cálculo da projeção da população futura foi aplicada a equação 1 (RIPSA, 2012).

População Futura:

(1)

$$PF = PA (1 + i)^n$$

Considerou-se, nesta pesquisa, que os RSU tenham um valor de 60,50% de umidade, conforme (MOREIRA et al., 2019). Sendo assim, será necessário que se faça a desidratação dos rejeitos e da matéria orgânica em no mínimo 36% para que os mesmos possam perder peso e se adequarem aos limites técnicos de capacidade e umidade da planta.

Os dados que foram conseguidos sobre a projeção de geração de resíduos sólidos de cada município foram encaminhados às empresas especializadas em plantas de incineração de RSU. A empresa LUFTECH apresentou um orçamento de uma planta para incineração de resíduos biogênicos de RSU.

Esta pesquisa se propôs a fazer somente a incineração dos rejeitos e da matéria orgânica após a sua hierarquização da gestão adequada, conforme a PNRS que são: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final adequada. Foram determinadas nesta pesquisa que a planta funcione 24 horas por dia, 26 dias no mês e 12 meses por ano.

4.2 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA GERADA PELA PLANTA

A planta possui capacidade de tratamento de 1000 Kg/h e poder calorífico de 2600 Kcal/Kg (LUFTECH, 2019). O potencial de recuperação de energia de resíduos sólidos urbanos foi calculado pela equação 2 (OUDA et al., 2014):

$$ERP = W_{dry} \times LHV \times n \quad (2)$$

A massa utilizada foi de 1000 Kg/h (LUFTECH, 2019). O n adotado foi de 30%, conforme (IRENA, 2015b). E o poder calorífico adotado foi de 1.816 Kcal/Kg, conforme Arias-Alzate et al. (2018). Com base no valor de ERP, foi calculada a receita com a produção de eletricidade com a equação 3:

$$E_{rev} = ET \times ERP \quad (3)$$

Para calcular a receita com a produção de energia considerou-se que a planta se enquadre na modalidade tarifaria convencional baixa tensão (B3) classe industrial, em que o valor do kWh custa cerca de R\$ 0,60008, valor tirado de (ENERGISA, 2019).

E para encontrar a quantidade de residências que poderiam ser beneficiadas, utilizou-se o valor do consumo médio das residências do estado do Tocantins, segundo Epe (2018), que é de 165,9 kWh/mês.

Para se estimar as receitas que poderiam ser geradas com a venda dos recicláveis usaram-se como referência os valores do plástico a um preço médio de R\$ 2.275/ton. (dois mil duzentos e setenta e cinco reais), papéis R\$ 285/ton. (duzentos e oitenta e cinco reais), metais R\$ 1.615/ton. (um mil, seiscentos e quinze reais) e vidros R\$ 30/ton. (trinta reais) Não foram informados dados para os têxteis, segundo o Compromisso Empresarial para a Reciclagem para a cidade de Goiânia-GO (CEMPRE, 2019).

4.3 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA PLANTA DE INCINERAÇÃO DE RSU.

Com base nos investimentos iniciais no incinerador orçado pela empresa LUFTECH, no valor médio de um sistema de cogeração tirado de (FILHO, 2009) e atualizado por Banco Central do Brasil (BCB, 2020^a) e no valor médio de 03 hectares, tirado de Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA, 2018), atualizado por (BCB, 2020^a) da área para a instalação da planta no município de Augustinópolis, das receitas totais que podem ser geradas e dos custos de operação e manutenção, foi realizada a análise de viabilidade econômica, em que esses valores foram inseridos em planilha do Excel nas equações para obtenção dos valores dos parâmetros econômicos: Valor Presente Líquido (VPL); Taxa Interna de Retorno (TIR); Período de Recuperação de um Investimento (PAYBACK), adotando-se uma TMA de 4,5% ao ano (Taxa Selic ano de referência dezembro de 2019), tirado de (BCB, 2020^b). Nesta pesquisa, foram propostos três cenários, que foram obtidos por meio destes parâmetros econômicos, e levando-se em consideração as seguintes condições:

- 1º Cenário:
 - Receita mínima necessária para o projeto ser viável;
 - $VPL = 0$;
 - TMA = 4,50% ao ano.

- 2º Cenário:
 - Receita prevista para o projeto
 - $VPL > 0$;
 - TMA = 4,50% ao ano.

- 3º Cenário:

- Receita prevista para o projeto;
- $VPL > 0$;
- TMA = 9% ao ano.

O valor de referência para o custo de tratamento dos RSU foi de R\$ 172,00 (cento e setenta e dois reais) por tonelada (BRITO, 2013) e atualizado por BCB (2020^a). Já o custo de operação e manutenção ficou estipulado em 10% das receitas projetadas para a planta (LUFTECH, 2019). Para o cálculo do VPL, foi utilizada a equação 4 e para o TIR, a equação 5 (KASSAI et al., 2000).

$$VPL = \frac{FC0}{(1+i)^0} + \frac{FC1}{(1+i)^1} + \frac{FC2}{(1+i)^2} + \frac{FC3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{FCn}{(1+i)^n} \quad (4)$$

Para o cálculo do TIR foi utilizada a equação 2:

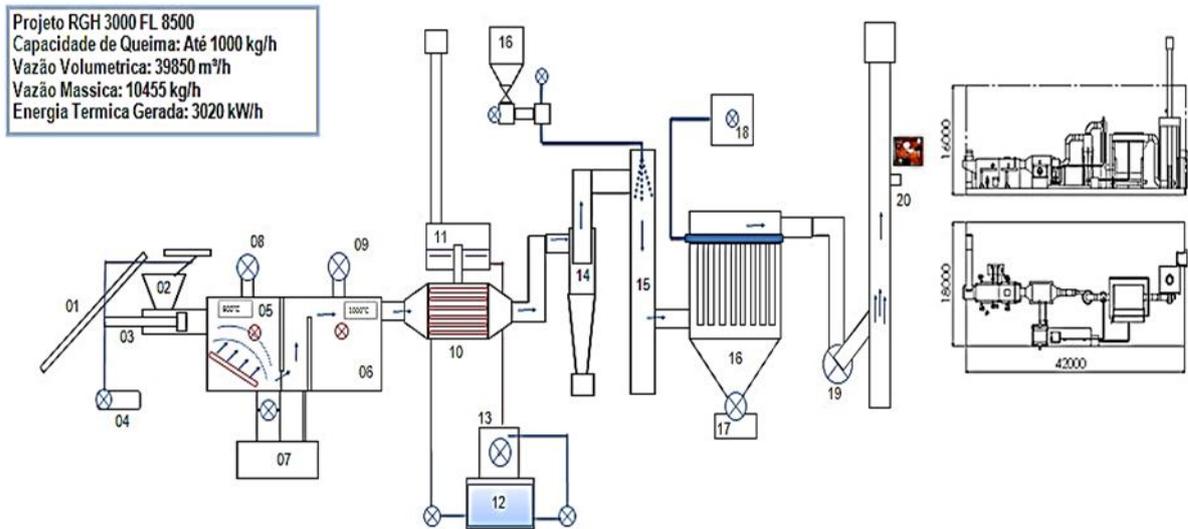
$$0 = \frac{FC0}{(1+TIR)^0} + \frac{FC1}{(1+TIR)^1} + \frac{FC2}{(1+TIR)^2} + \dots + \frac{FCn}{(1+TIR)^n} \quad (5)$$

Para encontrar o Payback, foi verificada na análise de viabilidade a quantidade de tempo gasto para a recuperação do investimento ao longo do horizonte de 20 anos do projeto.

As receitas com o comércio de recicláveis foram obtidas com base na constituição gravimétrica dos RSU, que por sua vez foi conseguida com base na constituição gravimétrica dos resíduos sólidos dos municípios do Tocantins, que possui os seguintes percentuais: Rejeitos 51,90%; Matéria Orgânica 10,13%; Papel/Papelão 15,19%; Plástico 11,39%, Têxteis 6,33%; Metais 3,80% e Vidro 1,27%, estes dados foram obtidos no Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Tocantins (PERS-TO), conforme (ECOTÉCNICA, 2016).

A Figura 5 mostra o fluxograma da planta de incineração de RSU orgânicos utilizada neste estudo.

Figura 5- Fluxograma de processo RGH 3000 FL 8500



Fonte: (LUFTECH, 2019)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 DADOS SOBRE OS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) DOS MUNICÍPIOS

As estimativas e projeções da geração geral de resíduos sólidos urbanos dos municípios pesquisados são apresentadas na Tabela 2.

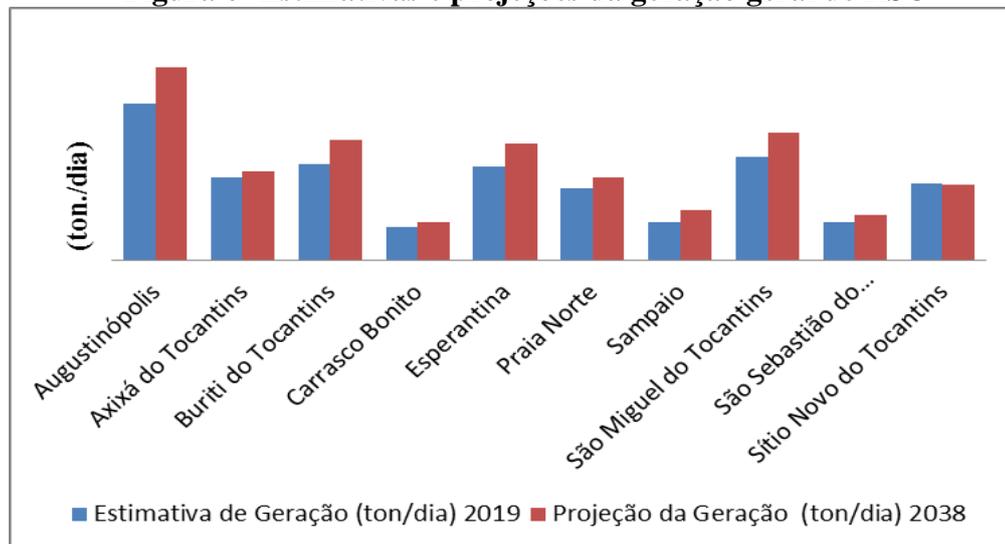
Tabela 2 Estimativas e projeções da geração geral de RSU.

Cidade	Estimativa de Geração (ton./dia) 2019	Projeção da Geração (ton./dia) 2038
Augustinópolis	9,76	12,05
Axixá do Tocantins	5,17	5,57
Buriti do Tocantins	6,01	7,50
Carrasco Bonito	2,05	2,39
Esperantina	5,83	7,25
Praia Norte	4,47	5,15
Sampaio	2,36	3,15
São Miguel do Tocantins	6,43	7,98
São Sebastião do Tocantins	2,40	2,85
Sítio Novo do Tocantins	4,79	4,69
Total:	49,26	58,58

Fonte: Autor.

As estimativas e projeções da geração geral de resíduos sólidos urbanos dos municípios pesquisados são apresentadas na Figura 6.

Figura 6- Estimativas e projeções da geração geral de RSU



Fonte: Autor.

As estimativas e projeções da geração de rejeitos e matéria orgânica dos municípios pesquisados são apresentadas na Tabela 3.

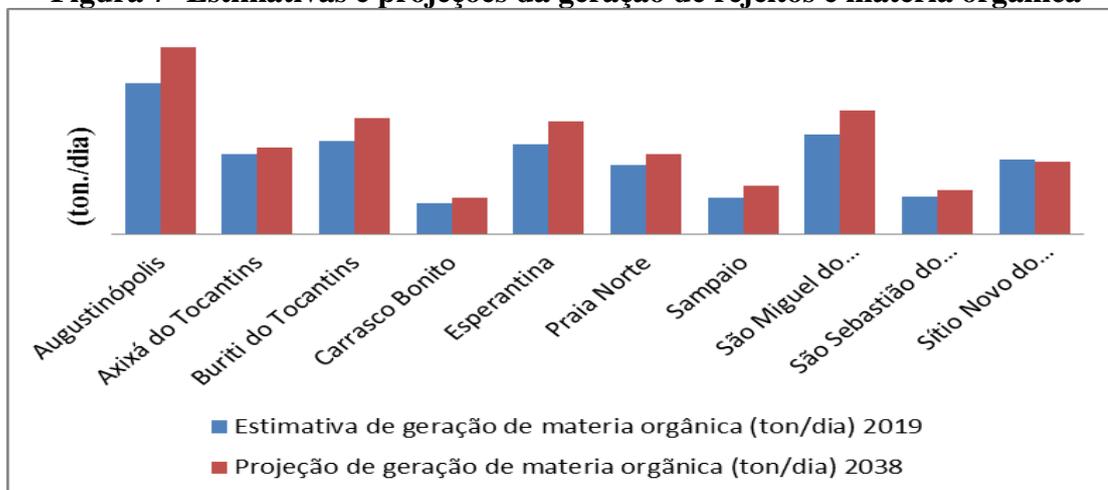
Tabela 3 Estimativas e projeções da geração de rejeitos e matéria orgânica

Cidade	Estimativa de geração de rejeitos e matéria orgânica (ton./dia) 2019	Projeção de geração de rejeitos e matéria orgânica (ton./dia) 2038
Augustinópolis	6,05	7,48
Axixá do Tocantins	3,21	3,45
Buriti do Tocantins	3,73	4,65
Carrasco Bonito	1,27	1,48
Esperantina	3,62	4,50
Praia Norte	2,77	3,19
Sampaio	1,46	1,96
São Miguel do Tocantins	3,99	4,95
São Sebastião do Tocantins	1,49	1,76
Sítio Novo do Tocantins	2,97	2,91
Total:	30,56	36,34

Fonte: Autor.

As estimativas e projeções da geração de rejeitos e matéria orgânica dos municípios pesquisados são apresentadas na Figura 7.

Figura 7- Estimativas e projeções da geração de rejeitos e matéria orgânica



Fonte: Autor.

Os valores estimados de geração rejeitos e matéria orgânica foram maiores que a capacidade da planta. Em função desta situação, deve ser considerada a necessidade de se fazer a desidratação em no mínimo 36% para que os mesmos percam peso e assim atendam aos requisitos técnicos de tratamento.

A geração per capita de RSU é de 0,53 kg/hab./dia para municípios de até 50.000 habitantes (SEMARH, 2016), aplicada neste estudo é inferior à encontrada no panorama brasileiro de resíduos sólidos que é de 1,039 kg/hab./dia (ABRELPE, 2019). Segundo Arrieta (2008), a renda per capita e o número de habitantes de uma localidade são condições determinantes na geração de RSU. O salário médio per capita/mês dos trabalhadores formais da região de estudo está entre 1,4 e 2,2 salários mínimos, ocupando as posições entre 457 e 2158, em relação aos 5570 municípios brasileiros (IBGE, 2018). Entende-se que as condições econômicas e a quantidade de habitantes de uma localidade influenciam significativamente na produção de resíduos.

5.2 PLANTA TÉRMICA DE INCINERAÇÃO

O modelo de incinerador que foi disponibilizado e cotado foi o RGH 3000 FL 8500 de Autocombustão é um reator de gaseificação horizontal de multicâmaras para a incineração de resíduos de origem orgânica, com capacidade de queima nominal de até 1000 Kg/h. O tratamento percorre as fases de Incineração, Tratamento e monitoramento contínuo dos gases, e é de autocombustão. Capaz de processar resíduos que possuam poder calorífico de 2.600 Kcal/Kg, densidade de 1,6Kg/m³ e uma umidade inferior a 25%, disponibilizando assim uma energia térmica nominal por volta de 2500 a 3000 KW (LUFTECH, 2019).

Este modelo, segundo a Luftech (2019), foi planejado usando-se o princípio da gaseificação e da combustão combinadas, decorrendo-se as fases de secagem, decomposição, gaseificação, combustão primária e pós-combustão. Este incinerador é constituído pelos seguintes elementos:

- Esteira de alimentação automática; Etiqueta (TAG) 01;
- Câmara de alimentação semiautomática, por bateladas, com sistema de acionamento pneumático com intertravamento; TAG 02;
- Cilindro de alimentação do forno; TAG 03;
- 01 (um) compressor de ar para o sistema pneumático; TAG 04;

- Câmara de gaseificação e combustão primária com sensor de temperatura; TAG 05;
- 2 (dois) queimadores para o início do processo de incineração;
- Câmara de combustão secundária, pós-combustão com sensor de temperatura e pressostato para comando do exaustor; TAG 06;
- Extrator automático de cinzas TAG 07;
- 02 (dois) ventiladores: 01 (um) para o ar primário e 01 (um) para o ar secundário; TAG 08 e TAG 09;
- Trocador de calor gás x água com condensador; TAG 10;
- Sistema de refrigeração de água; TAG 11;
- Tanque de armazenamento de fluídos de refrigeração; TAG 12;
- Torre de resfriamento de água para fluído de refrigeração; TAG 13;
- Multiciclone dupla função para redução de particulado de 10 micron e resfriador de gás; TAG 14;
- Câmara de neutralização de gases ácidos; TAG 15;
- Câmara de filtragens por mangas; TAG 16;
- Extrator automático de pó; TAG 17;
- Sistema de dosagem de reagentes neutralizantes; TAG 18;
- Compressor de ar para limpeza automática das mangas; TAG 19;
- Exaustor com inversor para ajuste automático da vazão; TAG 20;
- Chaminé com plataforma de amostragem de gases e monitoramento contínuo; TAG 21;
- 01 (um) sistema emergencial de contenção de temperatura;
- Controlador Lógico programável (CLP);
- 01 computador; 01 cabo;
- 01 software de interligação entre a CLP e o computador.

5.2.1 Sistema de tratamento de gases FL 8500

Os níveis de emissões e as condições impostas pelos órgãos ambientais cresceram recentemente, neste sentido a empresa Luftech tem procurado, permanentemente, se adequar às normativas de restrição brasileiras. Com isso, nas décadas recentes, aperfeiçoou o seu processo de tratamento de gases , aperfeiçoando a expertise de sua equipe técnica responsável pela startup das máquinas, suas manutenções preventivas e pela divulgação de conhecimento

de consultores alemães e professores de universidades federais brasileiras, oferecendo aos seus clientes o que encontra-se de mais eficaz e com a melhor relação custo-benefício de operacionalização no mercado brasileiro (LUFTECH, 2019).

5.2.2 Monitoramento contínuo dos gases

Este é um equipamento que realiza o trabalho de monitoramento contínuo de gases como CO e O₂ introduzido junto à tubulação de exaustão, onde se situam os sensores para realização da coleta e análise dos gases lançados.

O sensor para O₂ é constituído por dois discos de dióxido de zircônio que são envolvidos em ambos os lados por um anel de platina. Uma cobertura complementar de óxido de alumínio (Al₂O₃) tem a função de proteger o sensor de interferências do ambiente, aumentando a sua vida útil.

O sensor de CO opera de acordo com o princípio eletroquímico e dispõe de amplitude de medição de 0 a 300 ppm (LUFTECH, 2019). A Tabela 4 mostra os dados fundamentais da planta.

Tabela 4- Dados fundamentais da planta

Modelo do equipamento	Capacidade de queima nominal	Poder calorífico inferior	Densidade de resíduos até	Umidade inferior a	Energia térmica gerada
INCINERADOR RGH 3000 – FL 8500	1ton/hora	2.600 Kcal/Kg	1,6 Kg/m ³	25%	3020 KW/h

Fonte: (LUFTECH, 2019).

5.3 POSSÍVEIS RECEITAS GERADAS PELA PLANTA

5.3.1 Receitas com o tratamento dos RSU

A capacidade de tratamento da planta é de 24 ton./dia e o valor por tonelada de resíduos tratados custa cerca de R\$ 172,00 (cento e setenta e dois reais). Estima-se que se obtenha uma receita anual com o tratamento dos rejeitos e da matéria orgânica pela planta no valor de R\$1.287.936,00 (um milhão, duzentos e oitenta e sete mil, novecentos e trinta e seis reais).

5.3.2 Potencial de recuperação energética

Como base nos valores referenciais de capacidade de tratamento da planta, poder calorífico inferior, coeficiente de conversão térmica e custo do kWh da energia citados na metodologia, estimou-se que a planta de incineração é capaz gerar cerca de 4.492.800 kWh/ano, atender a aproximadamente 27.065 residências e produzir receitas da ordem de R\$ 2.696.040,00 (dois milhões seiscentos e noventa e seis mil e quarenta reais) ao ano.

Os custos de operação e manutenção da planta foram estimados, segundo Luftech (2019), em 10% das receitas geradas pela planta, que foram consideradas como as receitas com o tratamento do resíduo e com a sua recuperação energética.

Sendo assim, estimou-se um custo de operação e manutenção em cerca de R\$398.398,00 (trezentos e noventa e oito mil e trezentos e noventa e oito reais) ao ano.

5.4 ANÁLISE ECONÔMICA DA PLANTA TÉRMICA

5.4.1 Receitas geradas pela planta

A planta de incineração de RSU estudada é capaz de gerar receitas com o tratamento dos resíduos e com a energia que pode ser recuperada. A Tabela 5 mostra as estimativas das receitas.

Tabela 5- Receitas geradas pela planta para 2019

Receitas da Planta	Valores
Recuperação energética	R\$ 2.696.040,00
Tratamento dos RSU	R\$ 1.287.936,00
Total:	R\$ 3.983.976,00

Fonte: Autor.

O PCI para os rejeitos e a matéria orgânica adotado neste trabalho para o cálculo do potencial de recuperação energética da planta de incineração foi 1816 Kcal/Kg, conforme Arias-Alzate et al. (2018). Entretanto, a NBR 16849 determinou que o poder calorífico mínimo dos RSU para recuperação energética deve ser de no mínimo 2390 Kcal/Kg. Segundo Ohnishi et al. (2018), a incineração de 150 ton./dia de RSU é capaz de recuperar 12.2 kWh/ t de energia com uma eficiência de 13,2 %, sem a separação de plástico e papel.

O aumento da eficiência é relativamente menor com o aumento da separação de plástico e papel, já o custo do processo diminuiu com a separação de plástico e papel, e a baixa densidade da população influencia no aumento do custo de tratamento. O PCI e a quantidade de resíduos a ser tratada exercem influência relevante na recuperação de energia.

Segundo Freire (2013), para resíduos com $1.675 \text{ Kcal/Kg} < \text{PCI} < 2.000 \text{ Kcal/Kg}$, a viabilidade técnica do processo de incineração necessitará de um pré-tratamento. Já a planta orçada neste trabalho pela empresa Luftech está apta a tratar resíduos orgânicos com poder calorífico de 2600 Kcal/Kg .

Ao se optar ou não pela utilização da recuperação de energia dos RSU como uma possibilidade, um ponto crucial precisa ser examinado, a natureza e o volume do resíduo é uma das características mais importantes, e o seu poder calorífico não poderá ser inferior a 1673 Kcal/Kg (JGOSSE, 2019).

As informações mostradas permite-nos inferir que o resíduo a ser tratado deve ser analisado antes e se necessário deverá passar por um processo de desidratação e pré-tratamento, que pode ser a inclusão de rejeitos de sobras de outros processos, sem a geração de custos adicionais e deste modo, elevar o poder calorífico dos rejeitos e da matéria orgânica.

5.5 CONSTITUIÇÃO GRAVIMÉTRICA DAS CIDADES DO ESTUDO DE CASO

A projeção da constituição gravimétrica das cidades é mostrada na Tabela 6.

Tabela 6- Estimativo da constituição gravimétrica dos municípios toneladas dia 2019.

Cidade	Rejeitos e Matéria Orgânica	Papel/papelão	Plástico (PET/ sacolas	Têxteis	Metais	Vidro
Augustinópolis	6,05	1,48	1,11	0,62	0,37	0,12
Axixá do Tocantins	3,21	0,79	0,59	0,33	0,20	0,07
Buriti do Tocantins	3,73	0,91	0,69	0,38	0,23	0,08
Carrasco Bonito	1,27	0,31	0,23	0,13	0,08	0,03
Esperantina	3,62	0,89	0,66	0,37	0,22	0,07
Praia Norte	2,77	0,68	0,51	0,28	0,17	0,06
Sampaio	1,46	0,36	0,27	0,15	0,09	0,03
São Miguel do Tocantins	3,99	0,98	0,73	0,41	0,24	0,08
São Sebastião do Tocantins	1,49	0,36	0,27	0,15	0,09	0,03
Sítio Novo do Tocantins	2,97	0,73	0,55	0,30	0,18	0,06
Total:	30,56	7,48	5,61	3,12	1,87	0,63

Fonte: Autor.

5.5.1 Comércio de recicláveis

As estimativas de receitas que podem ser geradas com a venda dos recicláveis produzidos pelos municípios pesquisados são mostradas na Tabela 7.

Tabela 7- Estimativo de receitas com a venda de recicláveis para o ano de 2019.

Recicláveis	Quantidade estimada (ton./dia)	Receitas diárias estimadas	Receitas anuais considerados 312 dias do ano
Papel	7,48	R\$ 2.131,80	R\$ 665.121,60
Plástico	5,61	R\$ 12.762,75	R\$ 3.981.978,00
Metal	1,87	R\$ 3.020,05	R\$ 942.255,60
Vidro	0,63	R\$ 18,90	R\$ 5.896,80
Total geral:	15,59	R\$ 17.933,50	R\$ 5.595.252,00

Fonte: Autor.

5.5.2 Investimentos iniciais e custos de operação e manutenção

Os investimentos que serão realizados na planta, no sistema de cogeração de energia, na área para instalação dos equipamentos e o seu custo de operação e manutenção são de grande importância para determinar a viabilidade econômica de um projeto como esse. As Tabelas 8 e 9 mostram esses números.

Tabela 8- Detalhamento dos investimentos iniciais

Detalhamento dos Investimentos Iniciais	Valores
Planta de Incineração	R\$ 3.058.435,00
Sistema de cogeração de energia (Caldeira, Turbina e Gerador)	R\$ 1.262.390,70
Área para a instalação do Incinerador	R\$ 18.761,67
Total:	R\$ 4.440.000,00

Fonte: Planta (LUFTECH, 2019).

Tabela 9- Investimentos iniciais e custo de operação e manutenção

Investimento Inicial e Custo de Operação e Manutenção	Valores
Investimento inicial: Incinerador; Sistema de Cogeração de Energia e Área da Planta	R\$ 4.440.000,00
Custo anual de operação e manutenção: 10% das receitas geradas	R\$ 398.398,00

Fonte: Autor.

5.5.3 Estimação do custo de implantação e operação de um aterro sanitário de pequeno porte

A estimativa dos custos em torno da implantação até o encerramento de um aterro sanitário de pequeno porte foi obtida da pesquisa realizada da Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos (ABETRE) em cooperação com a Fundação Getúlio Vargas (2007).

A pré-implantação compreende os custos com: o terreno, a pesquisa de viabilidade e o licenciamento. A implantação abrange os gastos com: sistema de drenagem de águas da superfície; rede de coleta de líquido lixiviado e terraplanagem.

A operação compreende os gastos com: a mão de obra empregada; operacionalização de célula de acomodação e do mecanismo de escoamento e tratamento dos lixiviados. Para se realizar a etapa de encerramento do aterro sanitário, é preciso executar construção de um cobertura semipermeável e o processo de drenagem superficial.

Posteriormente ao encerramento, permanecem por mais de 20 anos as ações de operação dos mecanismos de drenagem, monitoramento e tratamento dos lixiviados. A soma destes custos foi levada em consideração para último ano do aterro. As despesas com o encerramento e pós-encerramento precisam ser levadas em consideração nas pesquisas, visto que abrangem ações imprescindíveis da implantação de um aterro sanitário (FGV; ABETRE, 2007).

Os custos de investimento em um aterro sanitário de pequeno porte que é capaz de receber até 100 toneladas dia de RSU são distribuídos ao longo de um horizonte de 42 anos. A fase de pré-implantação acontece no decorrer do primeiro ano. Já no segundo ano são desembolsados os custos relacionados à fase de implementação.

Os custos referentes à fase de operação são distribuídos ao longo de 20 anos, o que corresponde a 5% por ano. A fase de encerramento do aterro decorre-se durante o ano 23. Por

fim, a fase de pós-encerramento ocorre do ano 24 até 42 a uma taxa de investimento de 5% ao ano (FGV; ABETRE, 2007).

Para se estimar os custos de um aterro sanitário de pequeno porte, utilizaram-se os valores encontrados no estudo da Fundação Getúlio Vargas e Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos (FGV; ABETRE, 2007). A correção destes valores foi realizada com o uso do Índice Nacional de preços ao consumidor Amplo (IPCA, 2019), empregando os números oriundos da calculadora cidadã do Banco Central do Brasil (BCB, 2020a). Os custos de um aterro de pequeno porte são apresentados na Tabela 10 e a porcentagem dos gastos das fases de viabilidade é mostrada na Tabela 11.

Tabela 10- Investimento e custo de operação de um aterro de pequeno porte 2019

Etapa do Aterro	Participação s/Total	Custo da etapa
Pré-implantação	1,16%	R\$ 288.030,41
Implantação	5,09%	R\$ 1.263.857,59
Operação	86,70%	R\$ 21.527.790,30
Encerramento	0,93%	R\$ 230.920,93
Pós-Encerramento	6,13%	R\$ 1.522.091,75
Custo Total	100,00%	R\$ 24.832.690,98

Fonte: adaptado de FGV; ABETRE (2007) e corrigido pela calculadora do cidadão (BCB, 2020a).

Tabela 11- Disposição da porcentagem dos gastos das fases de viabilidade de um aterro de pequeno porte

Etapa do Aterro	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
Pré-Implantação	100%				
Implantação		100%			
Operação			5%		
Encerramento	100%			100%	
Pós-Encerramento				5%	5%

Fonte: FGV; ABETRE (2007).

A Tabela 10 foi adaptada e considerou um aterro sanitário de pequeno porte com capacidade de recebimento de até 24 toneladas/dia com um custo de disposição do RSU de R\$165,80 (cento e sessenta e cinco reais e oitenta centavos), por tonelada. A Tabela 11 apresentou os percentuais das fases de viabilidade de um aterro sanitário de pequeno porte em um horizonte de 42 anos.

5.5.4 Comparação entre os investimentos e os custos de manutenção e operação entre aterro sanitário de pequeno porte e a planta térmica de incineração

Quando comparamos os números que foram estimamos com base em bibliografias, trabalhos similares de outros autores para as técnicas de aterro sanitário de pequeno porte e de planta de incineração, nos mostra que o processo de incineração pode ser mais viável economicamente do que a tecnologia de aterros sanitários.

Isso representa uma possibilidade atraente aos pequenos municípios que quando se juntam tem maior capacidade financeira para gerir seus resíduos e com menos custos é possível atender os novos prazos estipulados pelo novo marco legal do saneamento sobre a disposição ambientalmente adequada dos rejeitos, que foi novamente prorrogada, conforme Brasil (2020), para dezembro deste ano.

A análise de viabilidade econômica da planta de incineração se deu mediante um exame analítico e discussão, baseados nos dados gerais levantados. Com base nos indicadores financeiros estudados, foi possível simular alguns cenários econômicos.

5.6 CENÁRIOS PROPOSTOS

Para um investimento inicial na planta, Sistema de cogeração de energia e área do projeto chegou-se ao valor R\$ 4.440.000,00 (quatro milhões quatrocentos e quarenta e quatro mil reais), tendo os seguintes resultados:

5.6.1 1º Cenário

Os parâmetros econômicos do projeto neste cenário, a receita mínima, as despesas e suas evoluções no horizonte de 20 anos para que a planta tenha viabilidade econômica são mostrados nas Tabelas 12 e 13 e na Figura 8.

Tabela 12- Parâmetros econômicos para o cenário 1

Períodos	20 anos
TMA A.P.	4,50%
VPL	R\$ 0,00
TIR	4,50%
Payback em períodos	13,25

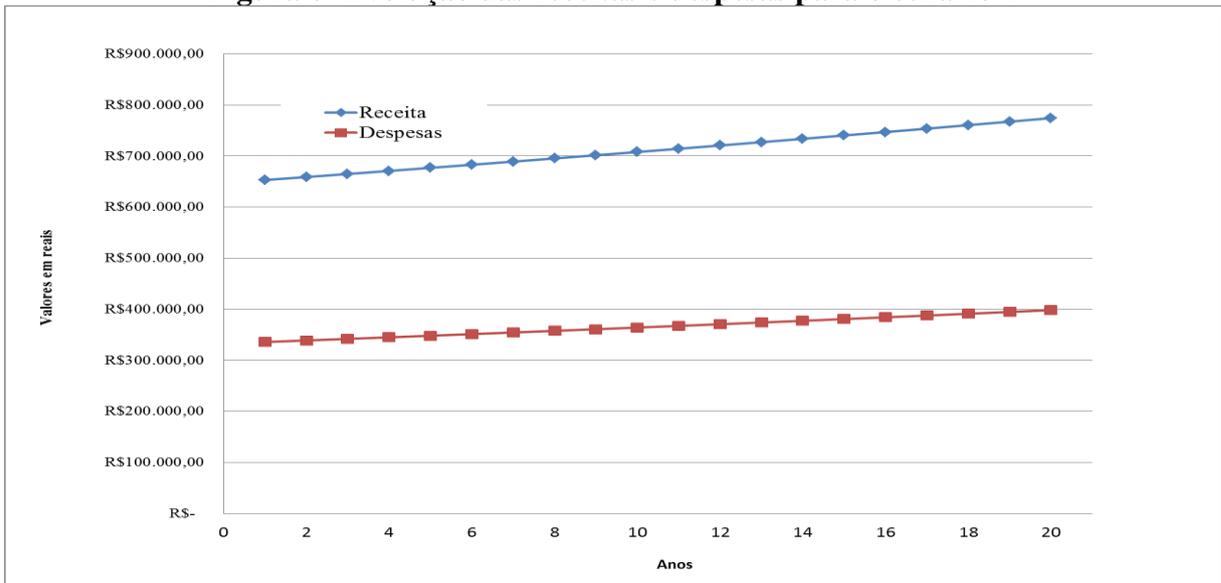
VIÁVEL

Fonte: Autor.

Tabela 13- Evolução das receitas e despesas para o cenário 1

Período	Receitas	Despesas
2019	R\$ 653.189,61	R\$ 336.035,37
2020	R\$ 659.068,32	R\$ 339.059,69
2021	R\$ 664.999,93	R\$ 342.111,22
2022	R\$ 670.984,93	R\$ 345.190,23
2023	R\$ 677.023,80	R\$ 348.296,94
2024	R\$ 683.117,01	R\$ 351.431,61
2025	R\$ 689.265,06	R\$ 354.594,49
2026	R\$ 695.468,45	R\$ 357.785,85
2027	R\$ 701.727,66	R\$ 361.005,92
2028	R\$ 708.043,21	R\$ 364.254,97
2029	R\$ 714.415,60	R\$ 367.533,27
2030	R\$ 720.845,34	R\$ 370.841,07
2031	R\$ 727.332,95	R\$ 374.178,63
2032	R\$ 733.878,95	R\$ 377.546,24
2033	R\$ 740.483,86	R\$ 380.944,16
2034	R\$ 747.148,21	R\$ 384.372,66
2035	R\$ 753.872,55	R\$ 387.832,01
2036	R\$ 760.657,40	R\$ 391.322,50
2037	R\$ 767.503,32	R\$ 394.844,40
2038	R\$ 774.410,85	R\$ 398.398,00

Fonte: Autor.

Figura 8- Evolução das receitas e despesas para o cenário 1

Fonte: Autor.

A Tabela 12, do cenário 1, mostrou que quando se simula um VPL igual a zero, o valor da TIR se iguala ao valor da TMA, e permite estimar qual seria as receitas e despesas mínimas para que o projeto possa ter sua viabilidade econômica.

5.6.2 2º Cenário

Os parâmetros econômicos do projeto neste cenário, a receita prevista, as despesas e suas evoluções no horizonte de 20 anos para que a planta tenha viabilidade econômica são mostrados nas Tabelas 14 e 15 e na Figura 9.

Tabela 14- Parâmetros econômico para o cenário 2

Períodos	20 anos
TMA A.P.	4,50%
VPL	R\$ 45.756.248,17
TIR	81,66%
Pay Back em períodos	1,24

VIÁVEL

Fonte: Autor.

Tabela 15- Evolução das receitas e despesas para o cenário 2

Período	Receitas	Despesas
2019	R\$ 3.983.973,00	R\$ 398.398,00
2020	R\$ 4.019.828,75	R\$ 401.983,58
2021	R\$ 4.056.007,21	R\$ 405.601,44
2022	R\$ 4.092.511,28	R\$ 409.251,85
2023	R\$ 4.129.343,88	R\$ 412.935,12
2024	R\$ 4.166.507,97	R\$ 416.651,53
2025	R\$ 4.204.006,55	R\$ 420.401,40
2026	R\$ 4.241.842,60	R\$ 424.185,01
2027	R\$ 4.280.019,19	R\$ 428.002,67
2028	R\$ 4.318.539,36	R\$ 431.854,70
2029	R\$ 4.357.406,22	R\$ 435.741,39
2030	R\$ 4.396.622,87	R\$ 439.663,06
2031	R\$ 4.436.192,48	R\$ 443.620,03
2032	R\$ 4.476.118,21	R\$ 447.612,61
2033	R\$ 4.516.403,27	R\$ 451.641,12
2034	R\$ 4.557.050,90	R\$ 455.705,89
2035	R\$ 4.598.064,36	R\$ 459.807,25
2036	R\$ 4.639.446,94	R\$ 463.945,51
2037	R\$ 4.681.201,96	R\$ 468.121,02
2038	R\$ 4.723.332,78	R\$ 472.334,11

Fonte: Autor.

Tabela 16- Comparação dos parâmetros econômicos

Parâmetros comparados	Incineração	Incineração
	Adaptado de (SANTOS et al., 2019) valores convertidos (BCB, 2020c).	Pesquisa atual
Investimento inicial	R\$ 290.199.257,50	R\$ 4.440.000,00
VPL	-R\$ 139.204.180,00	R\$ 45.756.248,17
Receitas Anuais	R\$ 33.775.285,00	R\$ 3.983.976,00
Custo de O e M	4% do investimento inicial segundo (GÓMEZ, et al., 2010) R\$ 11.782.223,00	10% das receitas R\$ 398.398,00
TMA	12%	4,5%
PAYBACK em (anos)	Investimento não recuperado	1,24
Horizonte do projeto (anos)	20	20

O processo de incineração pode ter influência econômica positiva com relação aos parâmetros payback, TIR e TMA, em especial em função de um maior volume de resíduos tratados. A TIR é um parâmetro de lucratividade de um projeto, de maneira que sendo o seu valor maior que a TMA, aponta que o projeto é lucrativo (ABDALLAH, 2018).

No momento em que o VPL for maior ou igual a zero significa que o investimento será recuperado a uma taxa mínima de atratividade de 4,5%, sendo assim o projeto se torna economicamente viável. Todavia, valores abaixo de zero indicam que o investimento inicial da planta de incineração não terá recuperação. Os dados mostrados na Tabela 14 demonstram que a planta possui o maior valor de VPL para o cenário 2, e considerado como um valor admissível. A Figura 9 mostra a maior relação entre receitas e despesas do cenário 2 e 3, em relação ao cenário 1, isto mostra que o cenários 2 e 3 possuem o maior potencial de viabilidade econômica. As receitas que o projeto possibilita com a recuperação de energética e os tratamentos térmicos do RSU interferem na sua viabilidade.

Uma comparação realizada na Tabela 16 revela que os parâmetros econômicos da viabilidade de um projeto dependem uns dos outros e variam conforme os seus valores. O VPL negativo (SANTOS et al., 2019) indica que o projeto é inviável. Adotou-se para este trabalho a TMA 4,5% e sua comparação a partir dos estudos de Santos et al, (2019), estabelecem em quanto cada um queria que seu projeto fosse atrativo. As receitas de todos os projetos dependerão de quais serão elas e seus respectivos valores, por isso os valores da Tabela 16 se diferenciam.

5.6.3 3º Cenário

Os parâmetros econômicos do projeto neste cenário, a receita prevista, as despesas e suas evoluções no horizonte de 20 anos para que a planta tenha viabilidade econômica são mostrados nas Tabelas 17, 18 e na Figura 9.

Os parâmetros econômicos do projeto neste cenário, a receita prevista, as despesas e suas evoluções no horizonte de 20 anos para que a planta tenha viabilidade econômica a uma TMA de 9,00 ao ano, Selic considerada para o mês de 12 de 2019 e $VPL > 0$, são mostrados nas Tabelas 17 e 18 e na Figura 9.

Tabela 17- Parâmetros econômicos para o cenário 3

Períodos	20 anos
TMA A.P.	9,00%
VPL	R\$ 30.377.764,63
TIR	81,66%
Pay Back em períodos	1,24

VIÁVEL

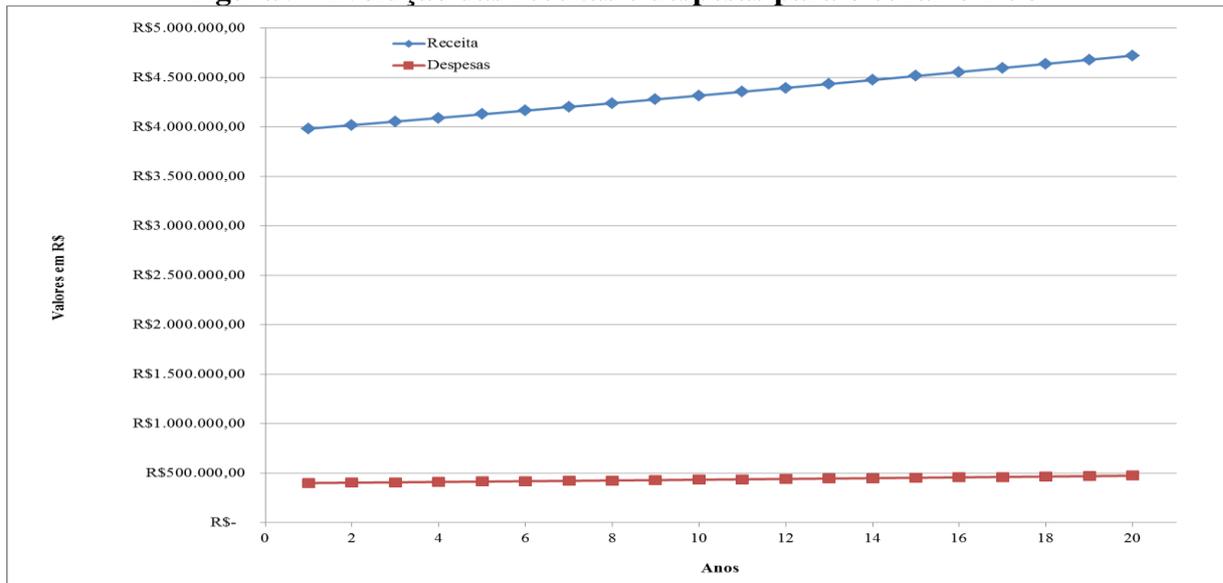
Fonte: Autor.

Tabela 18- Evolução das receitas e despesas para o cenário 3

Período	Receitas	Despesas
2019	R\$ 3.983.973,00	R\$ 398.398,00
2020	R\$ 4.019.828,75	R\$ 401.983,58
2021	R\$ 4.056.007,21	R\$ 405.601,44
2022	R\$ 4.092.511,28	R\$ 409.251,85
2023	R\$ 4.129.343,88	R\$ 412.935,12
2024	R\$ 4.166.507,97	R\$ 416.651,53
2025	R\$ 4.204.006,55	R\$ 420.401,40
2026	R\$ 4.241.842,60	R\$ 424.185,01
2027	R\$ 4.280.019,19	R\$ 428.002,67
2028	R\$ 4.318.539,36	R\$ 431.854,70
2029	R\$ 4.357.406,22	R\$ 435.741,39
2030	R\$ 4.396.622,87	R\$ 439.663,06
2031	R\$ 4.436.192,48	R\$ 443.620,03
2032	R\$ 4.476.118,21	R\$ 447.612,61
2033	R\$ 4.516.403,27	R\$ 451.641,12
2034	R\$ 4.557.050,90	R\$ 455.705,89
2035	R\$ 4.598.064,36	R\$ 459.807,25
2036	R\$ 4.639.446,94	R\$ 463.945,51
2037	R\$ 4.681.201,96	R\$ 468.121,02
2038	R\$ 4.723.332,78	R\$ 472.334,11

Fonte: Fonte: Autor.

Figura 9- Evolução das receitas e despesas para o cenário 2 e 3



Fonte: Autor.

O cenário 3 apresentou características semelhantes ao cenário 2 quanto à relação entre receitas e despesas e distintas do cenário 1. O seu valor de VPL alterou-se para R\$ 30.377.764,63 (trinta milhões, trezentos e setenta e sete mil, setecentos e sessenta e quatro reais e sessenta e três centavos), em função de ter se dobrado a TMA para 9%. Isto permite presumir que estes parâmetros se correlacionam.

O payback foi satisfatório e os retornos dos investimentos deram-se em um menor prazo com relação ao cenário desejado. O tempo necessário para a recuperação do investimento manteve-se o mesmo, ou seja, em 1,24 anos para os cenários 2 e 3 e foi de 13,25 anos no cenário 1, isto ocorreu devido à condição estabelecida no cenário 1 para o $VPL = 0$, isto é, a receita mínima para o projeto possa se tornar viável. Portanto, infere-se que estes parâmetros se correlacionam e exercem influência nos resultados.

6 CONCLUSÕES

Os municípios escolhidos para este estudo se enquadraram no porte e no perfil econômico objeto desta pesquisa. A cidade de Augustinópolis satisfaz as condições fundamentais para ser sede da instalação da planta, por possuir os requisitos de estrutura viária, equidistância dos outros municípios e maior geração de resíduos. Foi levado em consideração o fato de que só poderão ser incinerados na planta térmica os rejeitos e a matéria orgânica após terem passado pelo processo de hierarquização, possibilitando a geração de receitas com a comercialização dos recicláveis e promovendo a inclusão social dos catadores destas cidades.

A per capita de geração de resíduos está relacionada com as suas condições socioeconômicas de cada localidade. A evolução do crescimento da geração de resíduos, ao longo da projeção de 20 anos, mostrou-se pequena, isto demonstra que as populações pesquisadas, possuem uma situação econômica desfavorável em relação aos demais municípios brasileiros.

A capacidade de tratamento da planta foi maior que a estimativa de geração de rejeitos e matéria orgânica, assim será necessária que se faça a sua desidratação, para adequar os materiais as especificações técnicas do equipamento. O modelo do incinerador que foi selecionado, o RGH 3000 FL 8500 atende os objetivos do trabalho, pois é específico para resíduos biogênicos.

Em relação ao aspecto econômico, a planta se mostrou lucrativa para recuperação de energia, apesar do poder calorífico usado nos cálculos ser inferior ao especificado pelo equipamento, o que pode ser resolvido com inclusão de materiais que melhorem o seu poder calorífico, mas que não onere significativamente o projeto e o viabilize tecnicamente.

A planta atendeu às expectativas da pesquisa e poderá gerar receitas importantes, beneficiando as cidades deste estudo de caso com o tratamento e a recuperação de energia dos RSU. O estudo apontou ainda que, o comércio de recicláveis pode ser uma fonte de receita importante para as pessoas que trabalham neste ramo nos municípios.

A incineração se mostra uma alternativa interessante em relação a técnica de Aterro Sanitário que é a mais usualmente utilizada no tratamento de RSU. Comparando os valores de investimentos, custo de operação e manutenção da planta de incineração e a tecnologia de aterro sanitário, observa-se que o gasto com aterro é mais alto do que a incineração, tornando-a deste modo mais economicamente viável.

Do ponto de vista econômico, em todos os cenários simulados verificou-se a viabilidade do projeto, tanto o cenário 1 padrão com $VPL = 0$ e as receitas sendo mínimas, como para o cenário 2, o mais otimista $VPL > 0$ receitas previstas, foi comprovado um retorno financeiro satisfatório. Ressalta-se que não foi encontrado cenário de VPL negativo o que significaria a inviabilidade do projeto. A comparação realizada dos dados deste trabalho com o do autor demonstrou ainda que a viabilidade econômica de uma planta de incineração depende da relação entre receitas e despesas e de outros parâmetros como Investimento inicial, VPL , TMA , TIR e $Payback$.

Mesmo que se tenha que investir algum valor para se desidratar e pré-tratar os rejeitos e a matéria orgânica e assim elevar o seu poder calorífico, isto não seria problema, pois a elevada rentabilidade obtida (TIR) no projeto permite que gastos com essas eventualidades que possam existir no decorrer do tratamento térmico sejam contemplados.

Recomenda-se que seja realizada a instalação de uma usina de triagem regionalizada, que envolva a participação dos catadores de matérias recicláveis, promovendo a coleta seletiva e a conscientização ambiental.

Estas realidades justificam o investimento na incineração de RSU , uma vez que o projeto aborda a disposição dos resíduos de maneira sustentável, tratando e cuidando da gestão e manejo do meio ambiente. A utilização do lixo urbano para a produção de energia elétrica é uma das melhores opções para o tratamento dos resíduos sólidos urbanos, em particular para pequenos municípios, sendo uma energia que se renova e que já é utilizada em vários países.

Por fim, com base no referencial teórico abordado e nos dados levantados, as estimativas realizadas demonstraram que o processo de incineração se revelou viável para ser implementado em pequenos municípios. Quando concentrado em um só local, o tratamento de RSU de várias cidades torna as suas despesas e investimentos menores, proporcionando maior disponibilidade econômica para elas. Espera-se, ainda, que essa planta de incineração possa oportunizar uma evolução na qualidade de vida das pessoas, baseado em aspectos sociais, ambientais e de saúde.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3a ed. Brasília-DF: ANEEL, 2008. 236 p. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2008_AtlasEnergiaEletricaBrasil3ed/297ceb2e-16b7-514d-5f19-16cef60679fb >. Acesso em: 15 out. 2018.
- AMOO, O. M.; FAGBENLE, R. L. Renewable municipal solid waste pathways for energy generation and sustainable development in the Nigerian context. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, Hoboken, v. 4, n. 1, p. 17, 2013. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1186/2251-6832-4-42> >. Acesso em: 19 dez. 2018.
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodo de esgoto: tratamento e disposição final. **ABES**, Rio de Janeiro, p. 483 p., 2001.
- ARRIETA, B. G. Analisis de la Producción de Residuos Sólidos de Pequeños y Grandes Productores en Colombia: **Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico**, Bogotá, p. 28-29, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil- 2018/2019**. São Paulo-SP: ABRELPE, 2019. 68 p. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16849**: resíduos sólidos urbanos para fins energéticos- Requisitos. Rio de Janeiro-RJ: ABNT, 2020. Disponível em: < <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=437610> > Acesso em: 14 jul. 2020.
- BAKER, K.; UNAEGBU, E. U. Assessing the potential for energy from waste plants to tackle energy poverty and earn carbon credits for Nigeria. **International Journal of Energy Policy and Management**, v. 4, n. 2, p. 8–16, 2019. Disponível em: < <https://researchonline.gcu.ac.uk/en/publications/assessing-the-potential-for-energy-from-waste-plants-to-tackle-en> > Acesso em: 18 jul. 2019.
- BARBELI, M. C. A Cogeração de Energia e sua Importância do ponto de vista Técnico, Econômico e Ambiental. **Empreendedorismo, Gestão e Negócios**. v. 4, n. 4, p. 238-246, mar. 2015. Disponível em: <http://www.fatece.edu.br/arquivos/arquivos_revistas/empreendedorismo/volume4/12.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2019.
- BARROSO, Luciana de C. Lobão. Análise das potencialidades de uso da pirólise no contexto do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. **Repositório da Universidade Católica de**

Brasília, Brasília, p. 30, 2016. Disponível em: <
https://repositorio.ucb.br/jspui/bitstream/123456789/10822/1/LucianadeCarvalhoLobãoBarros_oTCCGraduacao2016.pdf>. Acesso em: 15 out. 2018.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do Cidadão**. BCB, 2020a. Disponível em: <
<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAO/publico/corrigirPorIndice.do?method=corrigirPorIndice>> Acesso em: 28 jul. 2020>

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Comitê de Política Monetária (COPOM)**: Histórico das Taxas de Juros Fixada pelo Copom e evolução da taxa Selic. BCB, 2020b. Disponível em: <
<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>>. Acesso em: 13 dez. 2019>

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Conversor de Moedas**. BCB, 2020c. Disponível em: <
<https://www.bcb.gov.br/conversao>>. Acesso em: 07 ago. 2020>

BASHIR, M. J. K.; Ng, C.A.; SETHUPATHI, S.; LIM, J.W. Assessment of the Environmental, Technical and Economic Issues Associated with Energy Recovery from Municipal Solid Waste in Malaysia. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 268, conference n. 1, 2019. Disponível em:
 <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/268/1/012044/pdf>>. Acesso em: 18 jul. 2020.

BERGAMASCHI, J. C.; PANDOLFI, M. A. C.; MARCELLINO, E. R. Aproveitamento de resíduos sólidos urbanos para incineração e a cogeração de energia. In: VIII Simpósio Nacional de Tecnologia em Agronegócio, 2016, Jales-SP. **Anais**. 2016. P. 9. Disponível em:
 <<http://www.fatecjales.edu.br/sintagro/images/anais/tematica2/aproveitamento-de-residuos-solidos-urbanos-para-incineracao-e-a-cogeracao-de-energia.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2019.

BOSMANS, A.; VANDERREYDT, I.; GEYSEN, D.; HELSEN, L. The crucial role of Waste-to-Energy technologies in enhanced landfill mining: A technology review. **Journal of Cleaner Production**, Heverlee, v. 55, p. 14, 2013. Disponível em:
 <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652612002557>>. Acesso em: 19 nov. 2018.

BRÁS, I.; SILVA, M.E.; LOBO, G.; CORDEIRO, A.; FARIA, M; LEMOS, L. T. DE. I. Refuse Derived Fuel from Municipal Solid Waste rejected fractionsa Case Study. **Energy Procedia**, n. 120, p. 349-356, 2017. Disponível em:
 <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217327972>>. Acesso em: 20 jul. 2020.

BRASIL. Lei nº 12.305, 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, de 03 de agosto. 2010. Seção 1, p. 3. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm%0A>. Acesso em: 18 out. 2018.

BRASIL. Portaria nº 274, 30 de abril de 2019. Disciplina a Recuperação Energética dos Resíduos Sólidos Urbanos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, de 02 de maio. 2019. Seção 1, p. 57-58 Disponível em: <<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=02/05/2019&jornal=515&pagina=58&totalArquivos=174>>. Acesso em: 06 mai. 2019.

BRASIL. Lei nº 14.026, 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, de 16 de julho. 2020. Seção 1, p. 1. Disponível em: < <http://www.in.gov.br/web/dou/-/lei-n-14.026-de-15-de-julho-de-2020-267035421> >. Acesso em: 17 jul. 2020.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, Birmingham, v. 38, n. 30, p. 68–94, mar. 2012. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048> >. Acesso em: 18 out. 2018.

BRITO, A. P. DE. **Análise Econômica Preliminar da Implantação de Incinerador de Resíduos Sólidos Urbanos na Região de Bauru**. 2013. 105f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2013. Disponível em: < <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/91722> >. Acesso em: 28 jul. 2020.

CARVALHO, G. B. DE. **Caracterização da produção da biomassa de capim-elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum.) cv. Cameroon, em função da adubação nitrogenada e irrigação em região semiárida**. 2014. 180 f. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014. Disponível em: < file:///C:/Users/IC/Downloads/Guilherme_Busi_de_Carvalho_versao_revisada.pdf >. Acesso em: 15 out. 2018.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM. **Cempre informa**: Preço do material reciclável. Edição 2014. nº 136. São Paulo-SP: CEMPRE, 2019. Disponível em: <<http://cempre.org.br/cempre-informa/id/9/preco-do-material-reciclavel>>. Acesso em: 22 nov. 2019>

DIAS, J. B.; PENA, L. L. S. Dificuldades para o Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Através da Incineração no Brasil. *Geosaberes*, Fortaleza, v. 6, n. 3, p. 173–180, 2016. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5548118>. Acesso em: 10 jan. 2019.

DONG, J.; TANG, Y.; NZIHOU, A.; CHI, Y.; WEISS-HORTALA, E.; NI, M.; ZHOU, Z. Comparison of waste-to-energy technologies of gasification and incineration using life cycle assessment: Case studies in Finland, France and China. **Journal of Cleaner Production**, v.

203, p. 287–300, 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618324831?casa_token=J6usFyz_ROUAAAAA:MkYfGYYIHx9wVMDpct9K2nz7AFhTAcSi9Q1U66krq7qxBr57ZU6MuVhDlv9hwRaOKVLzLdq-a38S>. Acesso em: 21 Jul. 2020

ECOTÉCNICA TECNOLOGIA E CONSULTORIA LTDA. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Tocantins**. Palmas -TO: 2016,427 p. Disponível em: <<https://central3.to.gov.br/arquivo/269964/>>. Acesso em: 06 ago. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica DEA 18/14- Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Série Recursos Energéticos. Rio de Janeiro-RJ: EPE, 2014. 50 p. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2018%20-%20%20Invent%C3%A1rio%20Energ%C3%A9tico%20de%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%20Urbanos%5B1%5D.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2019>

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018 ano base 2017**. Rio de Janeiro-RJ: EPE, 2018. 249 p. Disponível em: <<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2018vf.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2019>

ENERGISA TOCANTINS. **Informações**: Tarifas; Tipos de tarifa. Palmas-TO: ENERGISA, 2019. Disponível em: <<https://www.energisa.com.br/Paginas/informacoes/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx>>. Acesso em: 13 dez. 2019.

FILHO, P. L. D. **Análise de custo na geração de energia com bagaço de cana-de-açúcar: um estudo de caso em quatro usinas de São Paulo**. 2009. 175 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Energia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/25567/1/ItaloJoseLopesDeAlmeida_DISSERT.pdf> Acesso em: 04 mai. 2020.

FREIRE, Marcelo Lopes. **Estudo prévio de viabilidade econômica e energética para implantação de usina de incineração para resíduos sólidos urbanos no Brasil**. 2013. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em eletrônica), Universidade de São Paulo, São Carlos-SP: 2013. Disponível em: <http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/tce-08112013-153815/publico/Freire_Marcelo_Lopes.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2019

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS. **Estudo sobre os aspectos econômicos e financeiros da implantação e operação de aterros sanitários**. Relatório Final. Rio de Janeiro-RJ: FGV; ABETRE, 2007. 56 p. Disponível em: <<http://br456.teste.website/~abetre70/wp->

[content/uploads/2019/11/Abetre-Sistema-Declaratorio-2015-10.pdf](#)>. Acesso em: 21 jan. 2020.

GÓMEZ, A. et al. Potential and cost of electricity generation from human and animal waste in Spain. **Renewable Energy**, v. 35 n. 02, p. 498-505, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148109003139>>. Acesso em: 10 ago. 2020.

GREENPEACE. **Incineração e saúde humana**: Estudo do conhecimento sobre os impactos da incineração na saúde humana. 2011. Disponível em: <http://greenpeace.org.br/toxicos/pdf/sumario_exec_health.pdf>. Acesso em: 09 out. 2019.

GUTBERLET, J. O custo social da incineração de resíduos sólidos: recuperação de energia em detrimento da sustentabilidade. **Revista Geográfica da América Central**, v. 2, n. Número Especial EGAL, p. 1-16, 2011. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/pdf/4517/451744820736.pdf>>. Acesso em :11 jan. 2019

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE Cidades**: Estimativa populacional. Tocantins, 2019. Disponível em:< <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/to/.html> >. Acesso em: 29 ago. 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE Cidades**: Trabalho e Rendimento. Tocantins, 2018. Disponível em:<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/augustinopolis/panorama>>. Acesso em: 11 ago. 2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Série Relatórios Metodológicos**: Projeções da População Brasil e Unidades da Federação, 2013. Disponível em:<<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv86444.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sinopse do Censo Demográfico 2010**: População Total, 2019. Disponível em:<<https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?uf=17&dados=12>>. Acesso em: 29 ago. 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE Cidades**: Trabalho e Rendimento. Tocantins, 2018. Disponível em:<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/augustinopolis/panorama>>. Acesso em: 11 ago. 2020.

OHNISHI, S.; FUJII, M.; OHATA, M.; ROKUTA, I.; FUJITA, T. Efficient energy recovery through a combination of waste-to-energy systems for a low-carbon city. **Resources, Conservation and Recycling**, n. 128, p. 394- 405. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344916303433>>. Acesso em: 17 jul. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA. **Relatórios de Análise de Mercados de Terras SR 26 TO**. Brasília-DF: INCRA, 2018. Disponível em: <http://www.incra.gov.br/media/docs/mercado-terra/ramt_sr26_2018.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2020.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable Power Generation Costs in 2014: An Overview. **IRENA**, 2015 Disponível em: <https://doi.org/10.1007/SpringerReference_7300>. Acesso em: 25 jul. 2020.

JGOSSE, J. Incineração de resíduos e catadores: Um guia técnico sobre tecnologias de recuperação energética de resíduos sólidos. Série Recursos Energéticos. Nota Técnica da WIEGO nº 11. Manchester-UK, WIEGO, 2019. 28 p. Disponível em: <<https://www.wiego.org/publications/incineracao-de-residuos-e-catadores-um-guia-tecnico-sobre-tecnologias-de-recuperacao>>. Acesso em: 09 ago. 2020>

KASSAI, J. R.; KASSAI, S.; SANTOS, A. dos; ASSAF NETO, A. **Retorno de Investimento**: Abordagem matemática e contábil do lucro empresarial. 2a. ed. São Paulo: Atlas, 2000. 256 p.

KHIARI, B. et al. Analytical study of the pyrolysis process in a wastewater treatment pilot station. **Desalination**, v. 167, p. 39-47, 15 ago. 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916404003388>>. Acesso em: 08 jan. 2019.

LIM, J. S.; MANAN, Z. A.; ALWI, S. R. W.; HASHIM, H. A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 28, jun. 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112001451>>. Acesso em: 07 jan. 2019.

LUFTECH SOLUÇÕES AMBIENTAIS. **Proposta comercial N° 19-051**. Alvorada-RS, 2019, 5 p. Orçamento recebido por <heberth@uft.edu.br > 10 out. 2019.

LUNDIN, M.; OLOFSSON, M.; PETTERSSON, G. J.; ZETTERLUND, H. Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 41, n. 4, p. 255–278, 1 jul. 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344903001666>>. Acesso em: 09 jan. 2019.

MENEZES, R. A. A.; GERLACH, J. L.; MENEZES, M. A. Estágio Atual da Incineração no Brasil. In: VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública, 2000, Curitiba-PR, 2000. P. 1-13. Disponível em: <<http://www.resol.com.br/textos/Estado Atual da Incineração no Brasil.htm>>. Acesso em: 01 de fev. 2019>

MOREIRA, F. A.; LOURA, G. R.; SANTOS, I. F. dos; SILVA, M. M. da; PEREIRA, M. P. R. Caracterização físico-química dos resíduos sólidos gerados em uma instituição de ensino superior de sete lagoas MG. **Meio Ambiente em Foco**, Belo Horizonte, v. 3, p. 110-115, 2019. Disponível em: <<https://www.poisson.com.br/livros/ambiente/volume3/>>. Acesso em: 06 abr. 2020

MORGADO, T. C; FERREIRA, O. M. Incineração de Resíduos sólidos urbanos, aproveitamento na cogeração de energia: estudo para a região metropolitana de Goiânia-GO. **Webresol**, 2006a. Disponível em: http://web-resol.org/textos/incineracao_de_residuos_solidos_urbanos,.pdf. Acesso em: 12 jan. 2019.

MORGADO, T. C; FERREIRA, O. M. Incineração de Resíduos sólidos urbanos, aproveitamento na cogeração de energia: estudo para a região metropolitana de Goiânia-GO. **Webresol**, p. 6, 2006b. Disponível em: http://web-resol.org/textos/incineracao_de_residuos_solidos_urbanos,.pdf. Acesso em: 12 jan. 2019.

NASCIMENTO, J. C. F. DO. **Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2007. 119 f. Dissertação (Escola de Engenharia de São Carlos), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-10082007-132150/pt-br.php>>. Acesso em: 02 abr. 2020.

OLIVEIRA, G. C. DE. **Análise térmica e econômica do ciclo combinado integrado com gaseificação da casca de arroz**. 2014. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2014. Disponível em: <<http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10009965.pdf>> Acesso em: 02 jan. 2019.

OLIVEIRA, L. B.; ROSA, L. P. Usinas Termelétricas Híbridas: geração de energia com balanço nulo de emissões de gases do realizado estufa, usando combustível fóssil e biomassa residual. In: Congresso Brasileiro de Energia, 9. 2002, Rio de Janeiro. **Anais**, Rio de Janeiro: 2002. p. 1830–1836.

OUDA, O.; AL-WAKED, R.; RAZA, S. **Potential value of waste-to-energy facility in Riyadh city-Saudi Arabia**. The 8th Jordanian International Mechanical Engineering Conference. 2014. Disponível em: <file:///C:/Users/note/Downloads/JordanConfere>. Acesso em: 25 jul. 2020.

PARO, A. C.; COSTA, F. C. DA.; COELHO, S. T. Estudo comparativo para o tratamento resíduos sólidos urbanos: Aterros sanitários x incineração. **Revista Brasileira de Energia**, v. 14, n. 2, p. 5, 2º sem. 2008. Disponível em: <<https://www.sbpe.org.br/index.php/rbe/article/download/226/207/>>. Acesso em: 29 nov. 2019

PASSINATO, C. D. B. O Lixo e o Meio Ambiente: Panorama Internacional, 2008. **Pesquisas de Química**. Disponível em: <<https://crispassinato.wordpress.com/2008/07/15/o-lixo-e-o-meio-ambiente-panorama-internacional/>>. Acesso em: 17 jan. 2019.

POLETTI, J. A. F. **Viabilidade energética e econômica da incineração de RSU considerando a segregação para a reciclagem:** do lixo urbano da cidade de Maceió como alternativa energética. 2008. 119 f. Dissertação (Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/91712>>. Acesso em: 12 nov. 2019.

QUEZADO, L. H. N. **Avaliação de tecnologias para aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos.** 2010. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Departamento de Engenharia Química), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE: 2010. Disponível em: <http://www.eq.ufc.br/TFC/TFC_2010_Quezado.pdf> Acesso em: 12 jan. 2019.

RIBEIRO, R. S. **Investigação experimental e integração de um sistema de geração de energia elétrica por gaseificação de biomassa para comunidades isoladas.** 2007. 106 f. Dissertação (Departamento de Engenharia Mecânica), Universidade de Brasília, Brasília, 2007. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/3337>>. Acesso em: 27 dez. 2018.

RIPSA. Rede Interagencial de Informações para a Saúde. **Fichas de Qualificação do Indicador:** Taxa de Crescimento da População – A.3. 2012. Disponível em: <http://fichas.ripsa.org.br/2012/a-3/?l=pt_BR>. Acesso em: 11 ago. 2020.

SANTOS, D. S dos. **Viabilidade do aproveitamento do lixo urbano da cidade de Maceió como alternativa energética.** 2009. 112 f. Dissertação (Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/1127>>. Acesso em: 09 jan. 2019

SANTOS, J. M dos. **Avaliação Histórica do Planejamento Energético Brasileiro e Considerações Sobre a Introdução de Novas Tecnológicas.** 2017. 110 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1034/dissertacao_santos_3_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 01 abr. 2019

SANTOS, R. E. DOS.; SANTOS, I. F. S. DOS.; BARROS, R. M.; BERNAL, A. P.; FILHO, G. L. T.; SILVA, F. DAS. G. B. DA. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: Aneconomic and energy comparative analysis. **Journal of Environmental Management**, n. 231, p. 198–206, jan./jun. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479718311435>>. Acesso em: 16 jul. 2020.

Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119316313>>.
Acesso em: 13 jul. 2020.

SOARES, D.; PACIONE, T. R.; MOREIRA, R. DE. F. P. M.; DI DOMENICO, M.; ROSA, M. F. P.; JOSÉ, H. J. Gaseificação De Serragem De Madeira Com Vapor De Água: Estudo Cinético. **Scientia Cum Industria**. V. 4, n. 2, p. 119- 124. 2016. Disponível em: <<http://ucs.br/etc/revistas/index.php/scientiacumindustria/article/view/4524/pdf>>. Acesso em: 28 dez. 2018.

United Nations Environment Programme Suggested citation. **Waste-to-Energy: Considerations for Informed Decision-Making**. UNEP, 2019. 58 p. Disponível em: < <https://www.unenvironment.org/ietc/resources/publication/waste-energy-considerations-informed-decision-making> >. Acesso em: 14 jul. 2020.

VIEIRA, G. G.; PEDROZA, M. M.; SOUSA, J. F. DE. PEDROZA, C. M. O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto – uma revisão. **Revista Liberato**, v. 12, n. 17, p. 01–06, jan./jun. 2011. Disponível em: <[http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista_SIER/v. 12, n. 17 \(2011\)/7. processo de pir%F3lise.pdf%0A](http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista_SIER/v.12,n.17(2011)/7.processo%20de%20pir%C3%94lise.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2018.

World Health Organization (WHO). *Population health and waste management: scientific data and policy options*. Report of a WHO workshop Rome, Italy, 29-30 March 2007. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2007.