

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS GUARAPUAVA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ANA MARIA PARECY

**GERAÇÃO DE ENERGIA TERMOELÉTRICA ATRAVÉS DA
INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA
CIDADE DE GUARAPUAVA – PR**

**GUARAPUAVA
2021**

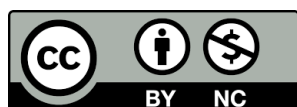
ANA MARIA PARECY

**GERAÇÃO DE ENERGIA TERMOELÉTRICA ATRAVÉS DA
INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA
CIDADE DE GUARAPUAVA – PR**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à
Coordenação de Engenharia Mecânica, como
requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel
em Engenharia Mecânica, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Renan Manozzo Galante

GUARAPUAVA
2021



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

TERMO DE APROVAÇÃO
GERAÇÃO DE ENERGIA TERMOELÉTRICA ATRAVÉS DA INCINERAÇÃO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA CIDADE DE GUARAPUAVA – PR

ANA MARIA PARECY

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em Guarapuava, Paraná na data 08 de dezembro de 2021, de maneira remota, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

RENAN MANOZZO GALANTE

Prof. Orientador

RAQUEL DA CUNHA RIBEIRO DA SILVA

Membro da Banca

SÉRGIO DALMÁS

Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

ANA MARIA PARECY

Nome do Aluno

O termo de aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.

PARECY, Ana M. **Geração de Energia Termoelétrica Através da Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos na Cidade de Guarapuava - PR.** 2021. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

RESUMO

Foi analisado o cenário da cidade de Guarapuava – PR, que produz 100 toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos por dia, sendo 50 de recicláveis, recicláveis esses descartados no aterro e não os que foram para a reciclagem, e 50 de orgânicos, excluindo os orgânicos por terem muita umidade e excluindo também vidros e metais, pelo alto teor de dioxinas, tem-se 45 toneladas de Resíduos Sólidos que podem ser queimados. Com a queima dessas 45 toneladas tem a produção de 1MW de energia. Foram utilizadas as análises de primeira lei e para a segunda lei foi feita a análise exérgica. A eficiência energética de primeira lei deu 17,96% e a eficiência exérgica da caldeira completa deu 19,73%. A análise de trocador de calor indicou os limites de temperatura para esses equipamentos.

Palavras-chave: Caldeira, Ciclo Rankine e Resíduos Sólidos Urbanos

PARECY, Ana M. Thermoelectric **Power Generation Through Incineration of Solid Urban Waste in the City of Guarapuava - PR**. 2021. 51 p. Course Conclusion Work to obtain a Bachelor's Degree in Mechanical Engineering – Federal Technological University of Paraná. Guarapuava, 2021.

ABSTRACT

The scenario of the city of Guarapuava - PR was analyzed, which produces 100 tons of solid urban waste per day, 50 of which are recyclable, recyclable, discarded in the landfill and not recycled, and 50 are organic, excluding organic by have a lot of moisture and also excluding glass and metals, due to the high content of dioxins, there are 45 tons of solid waste that can be burned. With the burning of these 45 tons, 1MW of energy is produced. The analyzes of the first law were used and the exergetic analysis was carried out for the second law. The first law energy efficiency was 17.96% and the exergetic efficiency of the complete boiler was 19.73%. The heat exchanger analysis indicated the temperature limits for these equipments.

Keywords: Boiler, Rankine Cycle and Urban Solid Waste

Sumário

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	12
Objetivo Geral.....	12
Objetivos Específicos.....	12
2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS	13
2.1.1. Compostagem	16
2.1.2 Incineração de RSU	16
2.1.3 Aterros sanitários	18
2.1.4 Controle de emissão de poluentes nos incineradores	19
2.2 Combustão	22
2.2.1 Poder Calorífico	23
2.2.2.1 Caldeira Flamotubular	24
2.2.2.2 Caldeira Aquatubular	25
2.3 WASTE TO ENERGY	27
2.4 Primeira lei da Termodinâmica.....	29
2.5 Análise Exergética	29
3.ASPECTOS METODOLÓGICOS	31
3.1 METODOLOGIA.....	31
3.2 Modelagem da Combustão	32
3.2.2 Cálculo das vazões mássicas.....	32
3.3.1 Dados para a construção do ciclo Rankine	34
3.4 CICLO RANKINE.....	35
3.4.1 Vazão mássica na Caldeira	35
3.4.2 Balanço de energia no Ciclo Rankine	36
3.4.3 Modelagem da Caldeira	37
4.RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1 Resultados da combustão.....	42
4.1.1 PCS E PCI.....	42
4.2 CICLO RANKINE.....	43
4.4 Análise da eficiência exergética.....	45
4.4.1 Eficiência exergética produtos e combutível	45
5.Conclusão.....	47
REFERÊNCIAS.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Produção de RSU nos Estados Unidos	14
Figura 2: Geração de RSU no Brasil.....	14
Figura 3: Composteira.....	16
Figura 4: Destino final de RSU no Japão.....	17
Figura 5: Incinerador de Resíduos Sólidos	18
Figura 6: Aterro Sanitário	19
Figura 7: Filtro de Mangas.....	20
Figura 8: Precipitador Eletrostático	20
Figura 9: Funcionamento de um ciclone.....	21
Figura 10: Secador Spray.....	22
Figura 11: Representação de uma caldeira de Recuperação	24
Figura 12: Caldeira Flamotubular	25
Figura 13: Caldeira Aquatubular.....	25
Figura 14: Funcionamento do Trocador calor duplo tubo.....	26
Figura 15: Funcionamento de um trocador de calor	26
Figura 16: Trocador de Calor por Placas	27
Figura 17: Planta Waste-to-Energy.....	28
Figura 18: Cálculos das eficiências exergéticas.....	30
Figura 19: Composição dos RSU no Brasil	31
Figura 20: Planta WtE (ciclo modificado do original feito pelo autor).....	34
Figura 21: Planta da Caldeira.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: PCI de alguns resíduos sólidos urbanos	23
Tabela 2: Dados para a construção do rankine	35
Tabela 3: Parâmetros utilizados	35
Tabela 4: Exergia Química Padrão	39
Tabela 5: Composição química dos resíduos sólidos urbanos	42
Tabela 6: Resultado das vazões mássicas	42
Tabela 7: Resultado das frações mássicas	43
Tabela 8: Resultados do Rankine.....	43
Tabela 9: Temperaturas pré-estabelecidas	44
Tabela 10: Valores de eficiência para variação T19	44
Tabela 11: Eficiência exergética dos equipamentos	45
Tabela 12: Eficiência exergética produto e combustível	45

1. INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento da população, a demanda de energia elétrica se torna cada vez maior, todo o tempo as pessoas estão conectadas a uma rede elétrica. Dessa maneira o problema com a demanda de energia se torna a cada dia que passa um pouco maior, além disso deve se ter a preocupação se a energia gerada é limpa, já que a sustentabilidade é o futuro das próximas gerações (MAZIOLI, 2019).

A gestão de resíduos é um problema crescente em todo o mundo. Em 2018, por exemplo, o Brasil produziu cerca de 79 milhões de toneladas de RSU - Resíduos Sólidos Urbanos, onde cerca de 42,3 milhões de toneladas foram descartados em aterros. Pesquisadores afirmam que a maneira de descarte de resíduos é insustentável a longo prazo, sendo necessária uma reformulação (ABRELPE, 2018).

Apesar de o tratamento de resíduos sólidos na cidade de Guarapuava ser feito da maneira correta, a ocupação de lixo é muito grande. Neste sentido, a incineração pode se tornar uma boa opção para diminuir esse grande volume. A incineração de RSU pode reduzir a quantidade de resíduos enviada para os aterros em até 90%, e ainda pode-se utilizar a energia térmica liberada pela incineração do RSU em geração de potência em ciclos Rankine (GALANTE, 2019).

Conforme dados coletados com o encarregado da coleta de Resíduos Sólidos em Guarapuava, a cidade já construiu seu segundo aterro, além de ter tido anteriormente um lixão. Com aumento da população a demanda de espaços para aterros se tornará cada vez maior.

No Brasil a incineração ainda é observada como algo muito danoso, sendo somente utilizada para resíduos perigosos e hospitalares, além de não ser feito seu aproveitamento energético (MORGADO, 2006).

Com a busca de novas alternativas para a destinação correta dos RSU, a demanda cada vez maior de energia as plantas WtE (Waste to Energy), são extremamente promissoras, pois conseguem aumentar a energia produzida e dar um fim útil ao RSU (BRITO, 2013).

JUSTIFICATIVA

Uma opção para a diminuição do volume acumulado de resíduos sólidos urbanos é a implementação da incineração, pois conforme a população vai crescendo e os centros urbanos se tornando maiores, os aterros vão tomando uma ocupação cada vez maior.

A decomposição de matéria orgânica nos aterros sanitários causa a liberação de gás metano, altamente poluente e de caro tratamento. Na incineração de RSU, o CO₂ liberado é

poluente, porém a recuperação energética vinda da incineração relaciona a emissão a um benefício. A energia obtida pelo RSU pode acarretar na não utilização de algum combustível fóssil para a mesma finalidade.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Quantificar o potencial de geração de eletricidade a partir da incineração de resíduos sólidos urbanos na região de Guarapuava.

1.1.2 Objetivos Específicos

Estimar a geração de RSU na região de Guarapuava, caracterizando a sua composição básica.

Modelar a combustão do RSU, observando o impacto da correta seleção de resíduos na potência do sistema e os requisitos de limpeza de gases de combustão.

Modelar um sistema de geração termelétrica adequado à capacidade regional de geração de RSU.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

Foi aprovada em 2010 a Política Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos (PRNS) que define os mesmos como “Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólidos ou semissólidos, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviável em face da melhor tecnologia disponível” (PNRS, 2010, p.3).

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) compreendem, principalmente, resíduos gerados em aglomerações humanas em áreas urbanas (SANTOS, 2021). Os resíduos sólidos são classificados segundo a ABNT, (2004) em:

- Classe I ou perigosos : são aqueles que apresentam riscos à saúde da população ou provocam efeitos adversos no meio ambiente;
- Classe II ou não inertes: apresentam características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade;
- Classe III ou inertes: não apresentam riscos à saúde nem ao meio ambiente.

Conforme Brito (2013), os resíduos sólidos podem ser classificados quanto a origem em:

- Resíduos domésticos: gerados em casas, apartamento, condomínios residenciais, entre outros;
- Resíduos comerciais: gerados em estabelecimentos comerciais e juntos com os resíduos domésticos constituem o “lixo domiciliar”;
- Resíduos públicos: em geral são os resultantes da natureza como galhos, folhas, poeira, terra;
- Entulhos de obra: gerados pela construção civil, são considerados os que mais exploram recursos naturais;
- Resíduos industriais: gerados pelas atividades industriais, são extremamente variados e devem ser estudados caso a caso;
- Resíduos radioativos: são aqueles que possuem radioatividade acima dos limites permitidos pelas normas ambientais. No Brasil estão a cargo da Comissão Nacional de Energia Nuclear;

- Resíduos Agrícolas: são basicamente restos de embalagens com agrotóxicos e fertilizantes, por esse motivo são extremamente perigosos.

Após a Revolução Industrial, a sociedade veio a se tornar cada vez mais consumista gerando uma quantidade cada vez maior de RSU, desta forma a preocupação com o descarte correto só vem a crescer, para que não ocorra problemas cada vez maiores em relação a poluição (MAZIOLI, 2019).

Na Figura 1, mostra o quanto um país como o Estados Unidos produz Resíduos Sólidos, no ano de 2017:

Figura 1: Produção de RSU nos Estados Unidos



Fonte: Senado Federal, 2017

Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020, diz que cada brasileiro produz em média, 379,2 kg de lixo por ano, o que significa mais de 1 kg por dia (SENADO FEDERAL, 2019).

Figura 2: Geração de RSU no Brasil

Geração de RSU no Brasil

geração total (t/ano)



geração per capita (kg/hab/ano)



Fonte: Abrelpe

agência **senado**

Fonte: Senado Federal, 2019

Existem três métodos usuais para o tratamento de resíduos sólidos: compostagem, incineração (esse por sua vez será comentado nesse trabalho) e aterro sanitário. Em todos esses processos existe produção de rejeitos que devem ser tratados (UIEDA,2009).

2.1.1. Compostagem

A compostagem é um dos métodos de tratamento de RSU no qual a matéria orgânica presente é transformada em produto estável rico em composto húmicos e por esse motivo esse produto é muito utilizado na Agricultura. Por razões agrônômicas a compostagem era muito utilizada na Antiguidade (MENDES, 2005).

A liberação de energia no processo de compostagem se dá por causa da atividade biológica de decomposição (VILELA,2019).

Para se obter um ganho energético com a compostagem, deve ser realizada a adubação do solo, pois deixa de gastar utilizando outros recursos como fertilizantes industriais.(QUEZADO, 2010).

A Figura 3, mostra o funcionamento de uma composteira.



Fonte:SEMASA,2021

2.1.2 Incineração de RSU

Conforme a ABNT (1989), a incineração é o processo de oxidação a alta temperatura que destrói, reduzindo o volume, ou recuperando materiais ou substâncias presentes.

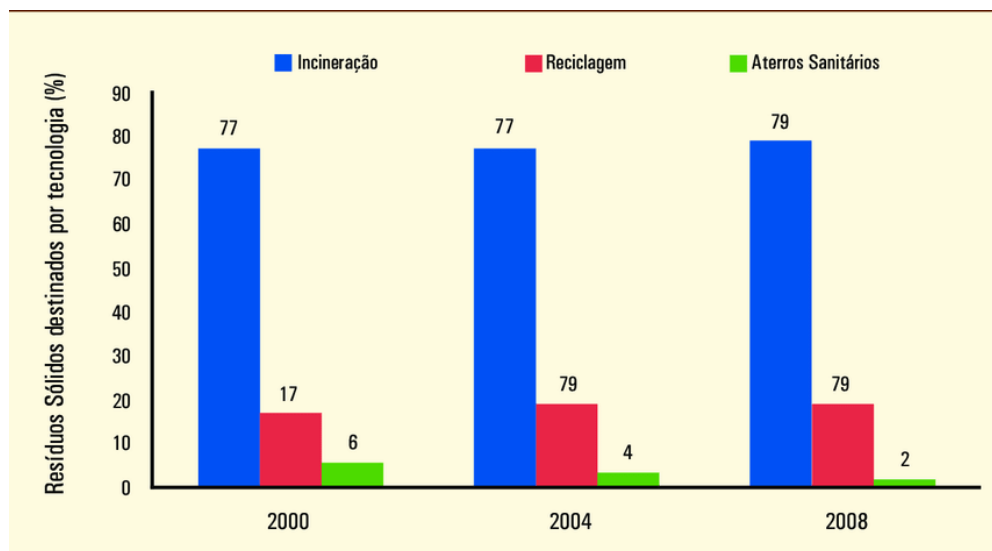
Segundo Miziaria, 2008 no século XIX surgiram diversas epidemias na cidade de São Paulo, fazendo-se necessário não somente amontoar-se os resíduos. Começou então a se tornar mais comum a incineração de lixo no Brasil. Mas o primeiro incinerador não surgiu na cidade de São Paulo e sim em Manaus em 1986 que processava 60 toneladas por dia de lixo doméstico (MORGADO, 2009).

Apesar da incineração no Brasil ter começado há alguns anos, hoje em dia ela é vista

como um processo de tratamento de RSU ruim, pois os equipamentos utilizados no país são obsoletos e inadequados fazendo a incineração ser nociva à saúde e prejudicial ao meio ambiente. Logo o tratamento térmico por incineração é visto por muitos brasileiros como algo danoso, mas em países como Alemanha, Japão e Suíça a incineração é considerada de forma diferente, como um bom processo de redução de volume de resíduos e geração de energia limpa (MENEZES,2000).

A Figura 4, mostra como a incineração de RSU é grande no Japão e foi aumentando com o decorrer dos anos, obviamente também aumentou a quantidade de RSU reciclado.

Figura 4: Destino final de RSU no Japão



Fonte: JUCÁ, LIMA, LUCENA, MARIANO,2014

A China tem como objetivo que 90% de todo o RSU produzido no país tenha a destinação correta e dentro dessa porcentagem, 35% seja incinerado, mas para isso acontecer deve ter o engajamento da população, que assim como o Brasil via a incineração de RSU como algo ruim. Dentro desse engajamento social, tem como medida o entendimento que a utilização do RSU para uma planta térmica e não sendo utilizado para aterros sanitários e traria maiores benefícios econômicos e de maneira menos danosa para a população, também pode conscientizar a população que as plantas WtE(plantas para aproveitamento energético do RSU, será discutido somente sobre essas plantas num tópico posterior), necessitam de uma menos área que os aterros sanitários,além de um aproveitamento da energia gerada. (GALANTE, 2019).

Os sistemas de incineração pode ser divididos em dois principais tipos (MENDES, 2005):

- Estáticos ou Bateladas:

São de funcionamento intermitente e possuem fácil operação.

- Dinâmicos ou Contínuos

Possui funcionamento contínuo e sua operação é complexa.

A Figura 5, mostra um incinerador:

Figura 5: Incinerador de Resíduos Sólidos



Fonte: NAVETHERM, 2021

2.1.3 Aterros sanitários

É um método de tratamento de RSU que consiste na disposição dos mesmos no solo seguindo critérios de engenharia e normas específicas (MENDES, 2005).

Sendo o método de tratamento mais utilizado no Brasil e sendo o método de tratamento utilizado na cidade de estudo deste trabalho, possui limitações, pois necessita de grandes espaços e como as cidades tem crescido isso se torna um problema cada vez maior. Além de tudo o aterro sanitário desvaloriza os terrenos ao redor. (MAZIOLI, 2019).

A decomposição do RSU nos aterros sanitários gera o biogás, que é composto principalmente pela gás metano e carbônico, sendo eles os principais geradores do efeito estufa, porém esse biogás pode ser utilizado como combustível e assim gerar energia elétrica, se houver a correta estruturação do aterro e o tratamento correto do gás. (FIGUEIREDO, 2011).

A Figura 6, mostra o funcionamento esquematizado de um aterro sanitário.

Figura 6: Aterro Sanitário



Fonte: KORF, 2000

2.1.4 Controle de emissão de poluentes nos incineradores

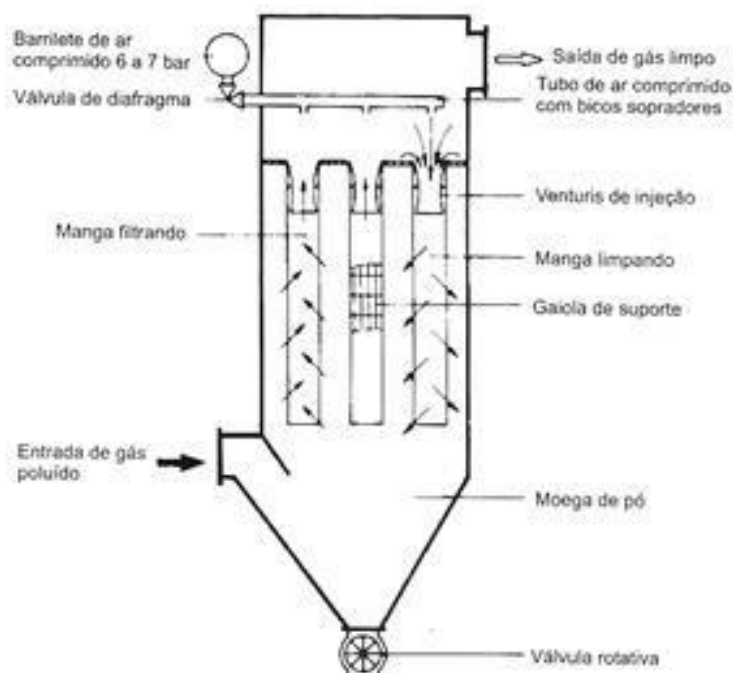
Um dos grandes problemas associados à incineração dos RSU é a geração de cinzas com grande potencial de toxicidade. Essas partículas podem ser separadas por tamanho e pelo caminho que tomam no sistema de incineração. As partículas maiores cairão no cinzeiro da fornalha, e devem ser descartadas ou tratadas de forma adequada. As partículas pequenas são arrastadas junto com os gases de combustão, podendo chegar até a eliminação na atmosfera. Como essas partículas são danosas à saúde e ao meio ambiente devem ser tratadas da maneira correta (GALANTE, 2019).

O filtro de mangas é um equipamento utilizado para filtrar particulados e traços de metais pesados de pequenos diâmetros (HOLANDA; BALESTIERI, 2002).

O funcionamento de um filtro de mangas consiste em fazer passar os gases por um filtro que retém as partículas poluentes e deixa passar os gases (BRITO, 2013)

A Figura 7 a seguir mostra um filtro de mangas e seus principais componentes.

Figura 7:Filtro de Mangas

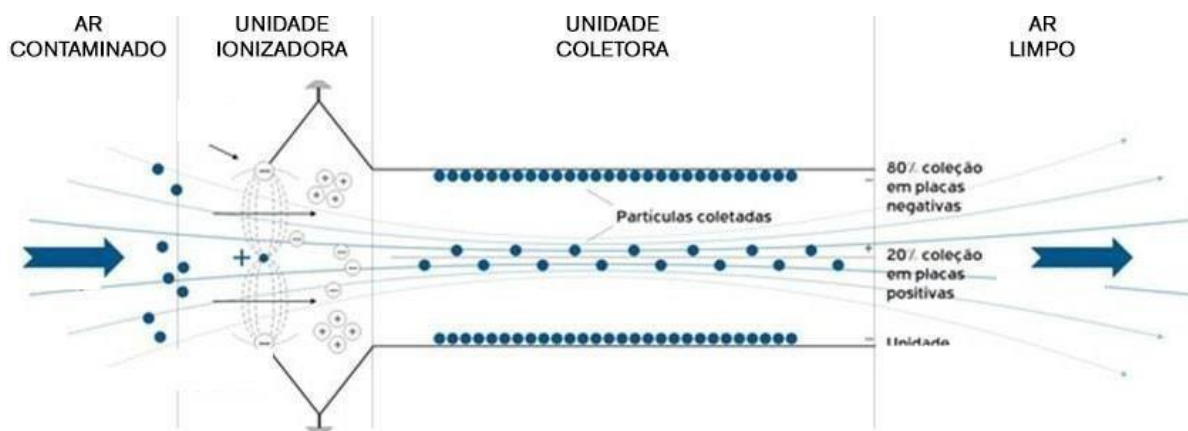


Fonte: AVAC,2021

Os precipitadores eletrostáticos são muito utilizados na indústria para remover partículas sólidas num meio gasoso, através das forças eletrostáticas, são extremamente eficientes no combate a poluição já que carregam os poluentes eletrostaticamente (BRITO, 2013).

A figura abaixo explica o funcionamento do precipitador eletrostático, onde é possível se ver as partículas sendo carregadas eletrostaticamente e criando uma camada.

Figura 8: Precipitador Eletrostático

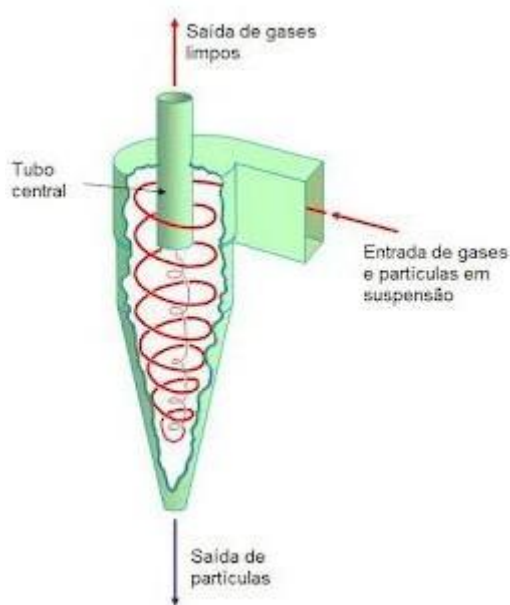


Fonte: Warwek,2021

Outro tipo de filtro utilizado pela indústria são os separadores ciclônicos, dentro do ciclone as partículas de sólido, são separadas da corrente gasosa, a partir da força centrífuga, depois o vórtex do ciclone, envia as partículas sólidas para o fundo do ciclone para serem recolhidas (COELHO, 2012).

A figura a seguir, mostra o funcionamento de um ciclone.

Figura 9: Funcionamento de um ciclone



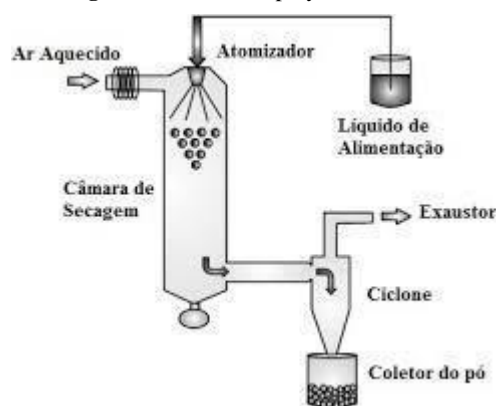
Fonte: Coelho, 2012

Como a incineração de RSU é a incineração de um resíduo que não se conhece muito bem e possui uma variabilidade muito grande, então pode ser que se queime algum resíduo com elementos extremamente danosos, por isso o Secador Spray, é uma boa saída, pois ele é utilizado para absorver a emissão de SO_2 e outros gases ácidos (HOLANDA; BALESTIERI, 2002).

O Secador Spray, realiza uma secagem por meio de uma corrente de ar quente que é forçada por ventiladores (SPRAY PROCESS, 2021).

A Figura 10, mostra um Secador Spray e seus principais componentes.

Figura 10: Secador Spray

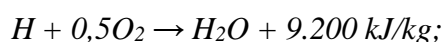
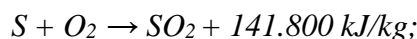
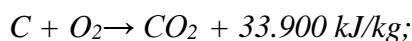


Fonte: Sosnik; Seremeta, 2015

2.2 Combustão

Primeiramente deve-se definir o conceito de combustão, conforme Miyake (2011), “combustão consiste em uma série de reações químicas entre os componentes do combustível” (p.14). Conforme Shapiro (2014), “Nas reações de combustão, a rápida oxidação dos elementos do combustível resulta em liberação de energia à medida que os produtos de combustão são formados” (p.654).

Os modelos para combustão baseiam-se na quantidade de oxigênio necessária para a completa oxidação dos elementos constituintes dos combustíveis. Nesse processo de oxidação ocorre ainda a liberação de energia, como mostrado nas equações a seguir:



Para cada kmol de O_2 são necessários 4,77 kmol de ar.

A massa de ar estequiométrica, m_{ar}^* , para a combustão completa do combustível é determinada pela equação:

$$m_{ar}^* = 4,77 M_{ar} \left(\frac{C_{cb}}{M_c} + \frac{S_{cb}}{M_c} + \frac{H_{cb}}{4M_h} - \frac{O_{cb}}{2M_O} \right)$$

onde cb é relativo ao combustível e M é a massa molar de cada componente.

2.2.1 Poder Calorífico

Segundo Pera (1990) define-se poder calorífico como a quantidade de calor, gerada pela unidade de massa ou de volume de um combustível submetido ao processo de combustão à pressão constante.

Para ser possível quantificar a energia interna contida no combustível calcula-se o PCI (Poder Calorífico Inferior) e o PCS (Poder Calorífico Superior) (MIYAKE, 2011).

Segundo Brito (2013), PCS é a quantidade de calor liberada para queimar completamente um quilograma de combustível, resultando gás carbônico e água, já PCI tem como diferença do PCS a entalpia de vaporização da água originada na combustão.

Para avaliar o comportamento térmico do sistema utiliza-se as equações de Conservação de Massa e Espécie da Primeira Lei da Termodinâmica.

Na tabela a seguir encontram-se o PCI de alguns resíduos sólidos urbanos.

Tabela 1: PCI de alguns resíduos sólidos urbanos

RSU	PCI (base seca) kcal/kg	Umidade (%)	Cinzas (%)	PCI* (base úmida s/ cinzas) kcal/kg
Matéria orgânica	4.300	66	25	712
Papel e papelão	3.800	21	5	2.729
Têxteis e couro	4.200	36	10	1.921
Madeira	3.700	25	5	2.490
Plástico	10.300	17	3	8.193
Borracha	9.700	5	6	8.633

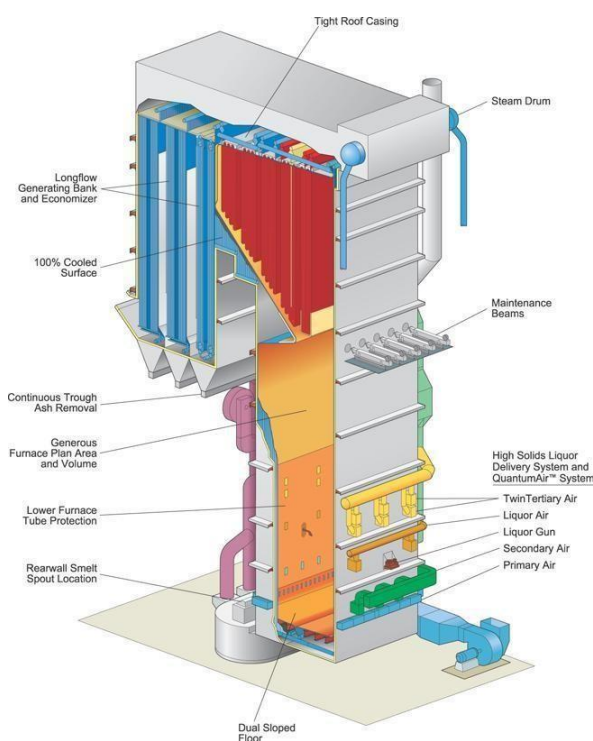
(*) obtido por cálculo com base nos dados da CODESC.

Fonte: Codesc (2003) apud CEMIG GT e FEAM, (2011)

2.2.2 CALDEIRA

A caldeira nada mais é que um equipamento que transforma água em vapor, é formada por três partes principais: a fornalha, a câmara de água e a câmara de vapor. Os dois principais tipos de caldeiras são as flamotubulares e as aquatubulares, sendo a última o objeto de estudo desse trabalho (PONTE, BARBOSA, RUFINO, 2010).

Figura 11: Representação de uma caldeira de Recuperação



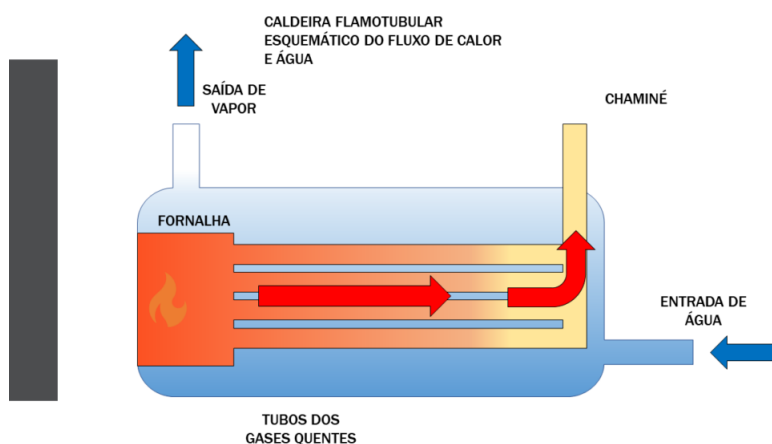
Fonte: Augusto Milanez, 2015

2.2.2.1 Caldeira Flamotubular

As caldeiras flamotubulares tem a particularidade de os gases provenientes da combustão circularem no interior dos tubos e a água ser aquecida pelo lado de fora. Tem como principais características baixa taxa de vaporização, demora na produção de vapor, baixo rendimento térmico, construção fácil e custo relativamente baixo (PONTE, BARBOSA, RUFINO, 2010).

Na Figura 12, tem o desenho esquemático de uma caldeira flamotubular, mostrando a água na parte de fora e por dentro do tubo a passagem dos gases.

Figura 12: Caldeira Flamotubular



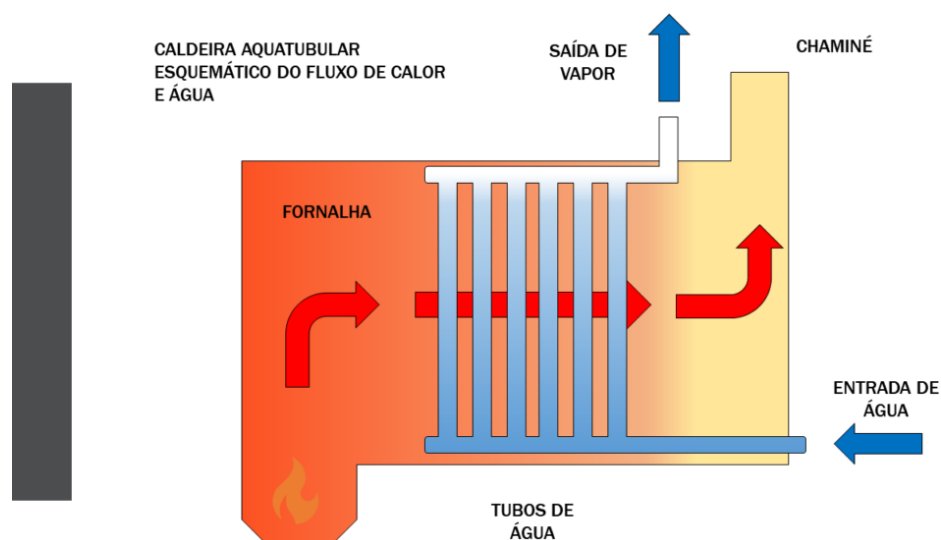
Fonte: TOGAWA ENGENHARIA,2021

2.2.2.2 Caldeira Aquatubular

Ao contrário da caldeira flamotubular na caldeira aquatubular a água é aquecida no interior dos tubos e os gases percorrem a parte de fora. Suas principais características são: rapidez no ganho de vapor, alta eficiência termodinâmica, produção de vapor superaquecido e produção de vapor acima de 200ton/h (PONTE, BARBOSA, RUFINO, 2010).

Na Figura 13, encontra-se a disposição esquemática de uma caldeira aquatubular, mostrando os gases passando pela parte externa e a água no interior dos tubos.

Figura 13: Caldeira Aquatubular



Fonte: TOGAWA ENGENHARIA,2021

2.2.2.3 TROCADORES DE CALOR

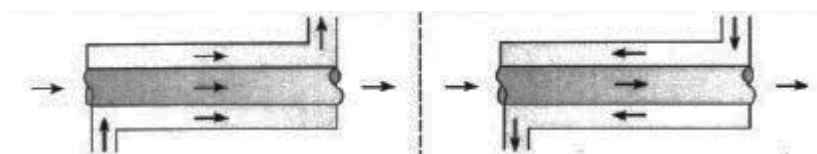
Trocadores de calor são dispositivos que possuem duas diferentes correntes de fluido que trocam calor entre si, sem se misturarem. O princípio de conservação de massa num trocador de calor exige que todo o balanço de fluxo que entra no trocador deve ser igual a soma de fluxos que saem (ÇENGEL, 2017).

Os principais tipos de trocadores de calor são (METALICA, 2021):

- Trocador duplo tubo: esse trocador é formado por dois tubos concêntricos. Nesse trocador um fluido escoar pelo tubo interno e outro pelo anular.

A Figura 14, demonstra o funcionamento desse trocador

Figura 14: Funcionamento do Trocador calor duplo tubo

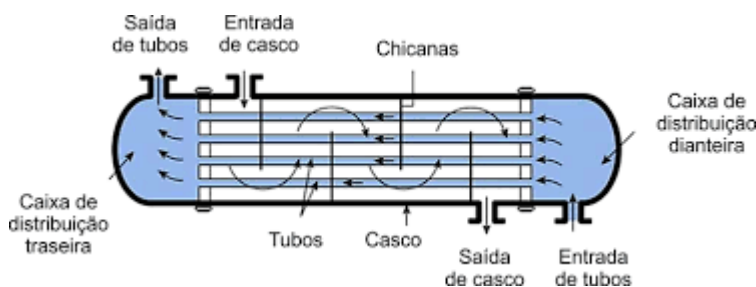


Fonte: Metalica, 2021

- Trocador de casco e tubo: é composto por um casco cilíndrico, contendo vários tubos. Um dos fluidos escoará pelo interior dos tubos e outro por fora dos tubos. Esse trocador de calor é utilizado nesse trabalho.

A Figura 15, mostra um trocador de calor de casco e tubo e suas partes principais.

Figura 15: Funcionamento de um trocador de calor

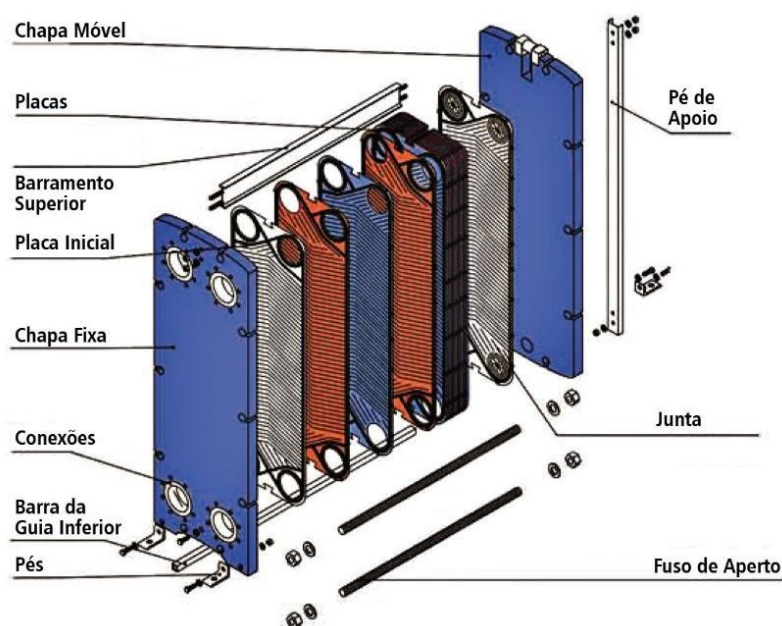


Fonte: Metalica, 2021

- Trocador de placas: esse trocador consiste em um suporte, onde placas são sustentadas por barras, entre essas placas os fluidos escoam.

A Figura 16, mostra uma representação de um trocador por placas e seus componentes.

Figura 16: Trocador de Calor por Placas



Fonte: BERMO,2021

2.3 WASTE TO ENERGY

Waste-to-Energy (WtE) é o aproveitamento da energia térmica dos RSU para cogeração ou geração de energia, ou seja, o aproveitamento energético da incineração dos resíduos (GALANTE, 2019).

A incineração de RSU com a finalidade de geração de energia limpa faz parte do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), adotado pelo protocolo de Kyoto (BRITO,2013).

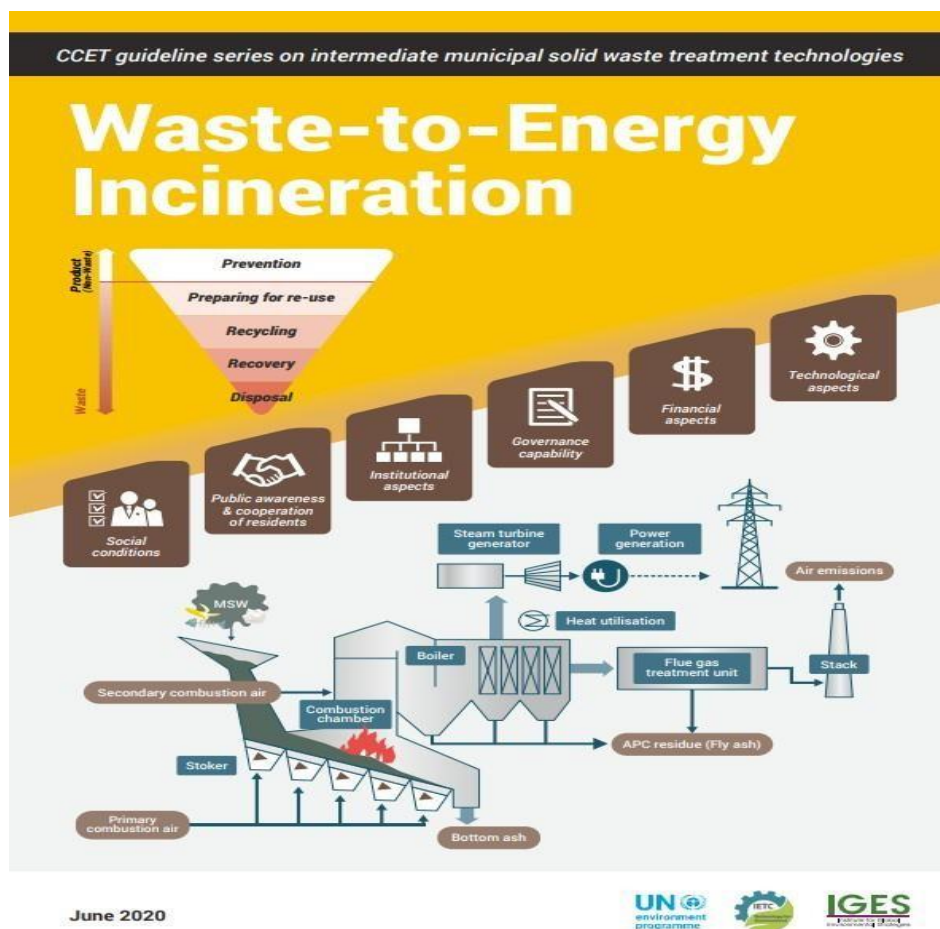
Em 2013, a Agência de Proteção Ambiental do EUA, classificou o WtE, como uma das fontes mais limpas de energia, pois no final dos anos 90, os EUA adotou uma política de utilização de máxima tecnologia no controle da incineração de RSU (GALANTE, 2019).

As plantas WtE se tornaram populares ao redor do mundo só em 2016, nesse ano o número de instalações WtE para RSU atingiu 1.618 plantas em todo o mundo, sendo 512 plantas na Europa, 822 plantas no Japão, 88 nos Estados Unidos e 166 na China. Nos Estados Unidos foram gerados 14.310,2 GWh de eletricidade a partir de plantas WtE. Uma produção grande de energia pelo fato de os Estados Unidos não usarem tanto essa energia como por exemplo, o Japão (SCARLAT, FAHL, DALLEMAND, 2018).

As plantas WtE se colocam acima dos aterros sanitários, pois dão um fim útil aos gases de efeito estufa, além do que permitiria algumas termoelétricas tradicionais serem desligadas sendo substituídas pelas WtE (GALANTE, 2019).

A Figura 17 mostra um desenho esquemático de uma planta WtE.

Figura 17: Planta Waste-to-Energy



Fonte: UNEP,2020

A Figura 17 tem como título resíduos para incineração de energia, acima do título tem uma faixa preta que está escrito série de diretrizes sobre tecnologias intermediárias de tratamento de resíduos sólidos municipais.

Logo abaixo do título, encontra-se primeiramente um triângulo invertido que fala sobre as etapas de cuidado com os resíduos sólidos urbanos. De cima para baixo do triângulo encontra-se escrito prevenção, preparação para reuso, reciclagem, recuperação e por último a eliminação.

Nos primeiro quadro marrom diz condições sociais, no segundo conscientização pública e cooperação de residentes, no terceiro aspectos institucionais, no quarto capacidade de governar, no quinto aspectos financeiros e último aspectos tecnológicos.

Na parte debaixo da figura tem uma planta WtE desenhada. Tem a entrada de combustível primário no incinerador e por cima a entrada de RSU, por dentro do incinerador tem a queima do combustível e o local de saída das cinzas. Saindo do incinerador tem a caldeira onde se encontra a saída das cinzas volantes, a saída do gás para a unidade de tratamento de gás, sendo o mesmo encaminhado para um exaustor e em cima da caldeira tem a utilização do calor para uma turbina de geração de vapor que leva o mesmo para a geração de energia.

2.4 Primeira lei da Termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica é um princípio de conservação de energia. O ciclo Rankine segue a primeira lei da termodinâmica, já que é um ciclo fechado, esse ciclo é considerado um ciclo de potência a vapor, já que os fluidos permanecem como vapor durante todo o ciclo (MAZIOLI, 2019).

O ciclo Rankine é composto por quatro elementos principais: bomba, caldeira, condensador e turbina, todos eles com regimes em escoamento permanente (ÇENGEL, 2017).

O ciclo Rankine é constituído pelas seguintes fases:

- 1-2 expansão dentro da turbina que possui uma eficiência isentrópica diferente de 1;
- 2-3 rejeição de calor isobárica no condensador (pressão constante);
- 3-4 compressão em uma bomba com eficiência isentrópica diferente de 1;
- 4-1 fornecimento de calor de maneira isentrópica em uma bomba;

2.5 Análise Exergética

A exergia é o potencial máximo de trabalho, ou seja a quantidade de energia que pode ser extraída como trabalho útil (ÇENGEL, 2017). A exergia é uma propriedade tanto dos sistema quanto do meio, pois ela mede o máximo potencial de realização de trabalho em um determinado meio. Através da análise exergética pode-se aplicar a segunda lei da termodinâmica.

A exergia química, é associada à entrada/saída de produtos/reagentes em reações químicas, no caso do seguinte trabalho ao combustível utilizado (GALANTE, 2019).

$$ech = \sum \frac{Fm \times e^{-ch}}{MM}$$

Fm é a fração mássica de cada componente e MM a massa molar.

A exergia física é função do estado termodinâmico do escoamento, ela é o máximo de trabalho útil teórico obtido, quando o sistema passa do estado inicial para o estado ambiente (DOMINGUES, 2020).

$$eph = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$$

Para encontrar a exergia nos componentes do ciclo é necessário realizar as contas como demonstrado na Figura 18. A partir dessa Figura são calculadas duas exergias: a exergia do combustível e a exergia dos produtos de cada equipamento.

Figura 18: Cálculos das eficiências exeréticas

Componentes	Compressor, bomba ou Ventilador	Turbina	Trocador de Calor	Caldeira
Esquemático				
Taxa de Exergia dos produtos, \dot{E}_P	$\dot{E}_2 - \dot{E}_1$	\dot{W}	$\dot{E}_2 - \dot{E}_1$	$(\dot{E}_6 - \dot{E}_5) + (\dot{E}_8 - \dot{E}_7)$
Taxa de Exergia do combustível, \dot{E}_F	\dot{W}	$\dot{E}_1 - \dot{E}_2 - \dot{E}_3$	$\dot{E}_3 - \dot{E}_4$	$(\dot{E}_1 + \dot{E}_2) + (\dot{E}_3 + \dot{E}_4)$

Fonte: Modificado de Galante, 2019

A relação entre produto e combustível determina a eficiência exerética de um equipamento e quanto melhor for a transformação de combustível em produto, mais perto do caso ideal é o equipamento. Uma máquina de Carnot teria eficiência exerética igual a 1.

3. ASPECTOS METODOLÓGICOS

3.1 METODOLOGIA

Nessa seção será mostrado como o ciclo de estudo nesse trabalho além das equações necessárias para encontrar os resultados esperados.

Conforme dados coletados com o encarregado da coleta de resíduos da cidade de Guarapuava obteve-se os seguintes dados de geração de resíduos na cidade, apenas na região urbana:

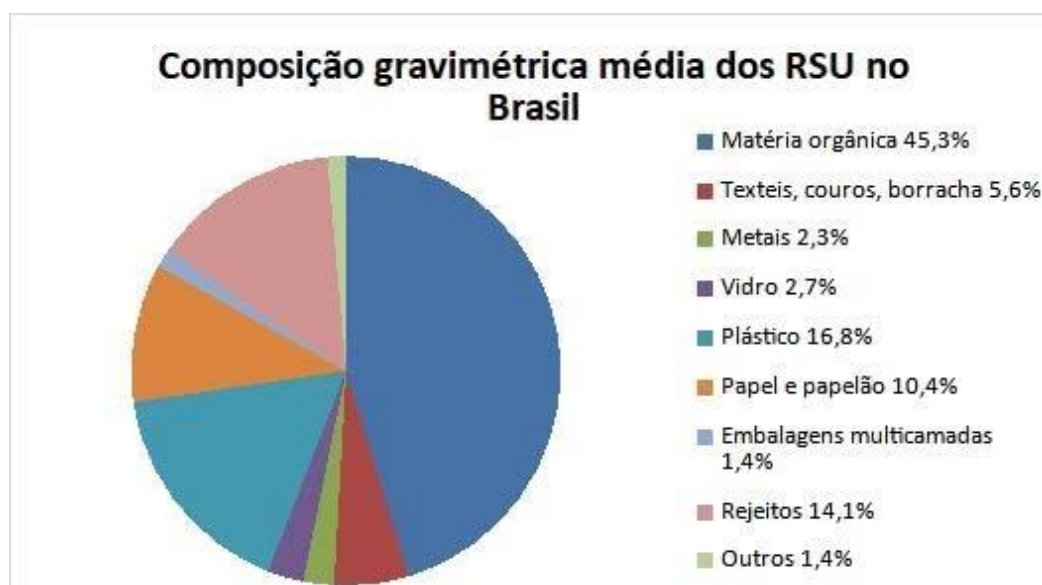
- 100 toneladas de resíduos sólidos são produzidos por dia;
 1. 50 toneladas de resíduos orgânicos;
 2. 50 toneladas de resíduos recicláveis;

No município de Guarapuava é realizada a coleta de recicláveis porém essa parcela que é descartada no aterro foi a que não foi realizada a coleta, por diversos motivos seja por não realização da separação correta, já que alguns resíduos sólidos ficam misturados, a falta de limpeza e carência de infraestrutura adequada.

Como observado o município de Guarapuava tem uma produção de resíduos de 4 ton/h. Será considerado para a incineração somente a parte dos recicláveis, pois a parte orgânica possui muita umidade, sendo deixada essa parcela de RSU para a compostagem, assim podendo ser utilizada para a agricultura.

A distribuição de RSU em Guarapuava é semelhante a distribuição brasileira como mostrada na Figura 19.

Figura 19: Composição dos RSU no Brasil



Fonte: Ecodebate, 2021

Como observado no gráfico acima, metais e vidros somam 5%, descontando dos 50% de recicláveis, temos 45% que podemos queimar, chegando a uma vazão mássica de combustível de 1,875ton/h.

Primeiramente será modelado o ciclo Rankine, sendo embasado na 1ª Lei da Termodinâmica, tendo os dados obtidos da monografia de Jéssica Mazioli (MAZIOLI, 2019).

Com a modelagem do ciclo Rankine será encontrada a eficiência do ciclo, e as condições de entrada e saída da caldeira, com isso é possível encontrar a eficiência da caldeira e assim realizar a modelagem da combustão. Após isso os trocadores de calor serão modelados para encontrar as suas temperaturas de entrada e saída.

3.2 Modelagem da Combustão

3.2.1 Cálculo do PCS e PCI

Para poder posteriormente calcular a vazão mássica de vapor na caldeira, é necessário calcular o poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico superior (PCS), os mesmos são encontrados pelas equações abaixo:

$$PCS = 36400C + 86300H - 75000 + 2800N - 163300S + 6200Cl \quad (3.1)$$

$$PCI = PCS - 2440(9H + W) \quad (3.2)$$

C, H, O, N, S e Cl, são as porcentagens de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e cloro no RSU e W é porcentagem e excesso de ar.

3.2.2 Cálculo das vazões mássicas

Para que toda a energia presente no combustível seja liberada é preciso que um mínimo de ar seja fornecido para fechar o balanço estequiométrico.

$$\dot{m}_{ar_{steq}} = 138,23 \times \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} + \frac{O}{32} \right) \quad (3.3)$$

Utilizando excesso de ar de 1,5:

Teremos:

$$e \times \dot{m}_{ar_{steq}} = \dot{m}_{ar_{comb}} \quad (3.4)$$

Logo,

$$\dot{m} r_{total} = \dot{m} r_{comb} \times \dot{m}_c \quad (3.5)$$

A $\dot{m}_c = 1,875 \text{ ton/h} = 0,520833 \text{ kg/s}$

Para calcular as frações mássicas dos compostos químicos, tem-se que:

$$MCO_2 = \frac{44}{12} C \quad (3.6)$$

$$MSO_2 = \frac{64}{32} S \quad (3.7)$$

$$MH_2O_{steq} = (W + 9 \times H) \quad (3.8)$$

$$MH_2O = MH_2O_{steq} + W_{ar} \times e \times M_{ar_{steq}} \quad (3.9)$$

$W_{ar} = 0,009$, sendo o valor da massa de água dissolvida por massa de ar.

$$MN_2_{steq} = 0,7685 \times M_{ar_{steq}} + N \quad (3.10)$$

$$MN_2 = MN_2_{steq} + 0,7685 \times (e - 1) \times M_{ar_{steq}} \quad (3.11)$$

$$MO_2 = 0,2315 \times (e - 1) \times M_{ar_{steq}} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{gasteoria} = & MCO_2 + MSO_2 + MO_2 + MH_2O \\ & + MN_2 \end{aligned} \quad (3.13)$$

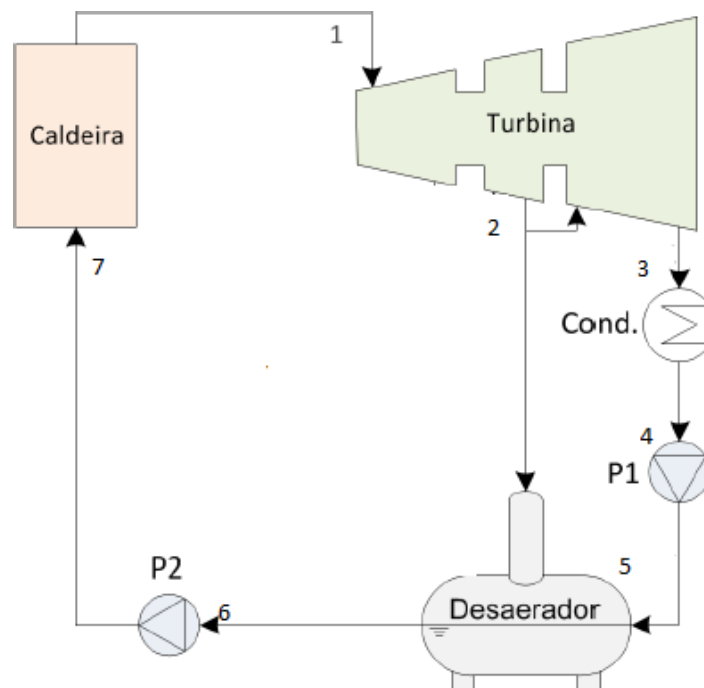
Finalmente:

$$\dot{m}_{gastotal} = \dot{m}_{gasteoria} \times \dot{m}_c \quad (3.14)$$

3.3 CICLO DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICA

No ciclo de geração termoelétrica, a planta e seus componentes são apresentados na Figura 20.

Figura 20: Planta WtE (ciclo modificado do original feito pelo autor)



Autor:Modificado de Galante, 2019

Na Figura 20 o ponto 1 representa a entrada de vapor d'água superaquecido na turbina. O ponto 2 é o ponto de extração da turbina para o des aerador. O des aerador serve para tratar a água que vai entrar na caldeira. Ele trata a água removendo os gases como O_2 e N_2 . O ponto 3 é o ponto de entrada da água no condensador. P1 e P2 são as bombas, responsáveis pelo aumento da pressão da água no sistema.

3.3.1 Dados para a construção do ciclo Rankine

Para a modelagem do ciclo de geração elétrica e caldeira foram utilizados os dados do trabalho da autora Mazioli, 2019 que modelou uma caldeira para o município de Belo Horizonte.

Dados utilizados do trabalho da Mazioli, 2019:

Tabela 2: Dados para a construção do rankine

Vazão mássica de RSU	10 [ton/h]
Temperatura de entrada da água na caldeira	80 [°C]
Temperatura de saída do vapor na caldeira	420 [°C]
Pressão de saída do vapor na caldeira	42 [bar]
Pressão de saída do condensador	0,15[bar]
Eficiência isentrópica da turbina	0,8

Fonte:MAZIOLI, 2019

Também foram utilizados alguns parâmetros para a resolução das contas que seguem nos tópicos posteriores, na Tabela 3 encontram-se esses parâmetros:

Tabela 3: Parâmetros utilizados

cpcinza	1,25
cpar	1,0048
cpgás	1,1
perdas	0,027
War	0,009
eficiência da bomba	0,85

Fonte: Autoria Própria, 2021

3.4 CICLO RANKINE

A análise energética é feita pelo balanço de energia, comprovando assim a primeira lei da termodinâmica, que é a conservação de energia, com base num escoamento em regime permanente. No EES foi realizado o balanço em cada ponto do ciclo de geração de energia termelétrica.

3.4.1 Vazão mássica na Caldeira

Antes de realizar o ciclo Rankine é necessário calcular a vazão mássica da caldeira, para isso utiliza-se a seguinte equação :

$$\eta_{cald} = \frac{\dot{m} \cdot \Delta h}{\dot{m}_c PCI} \quad (3.15)$$

$$\dot{m}_1 = \frac{\eta \cdot \dot{m}_c \cdot PCI}{\Delta h} \quad (3.16)$$

$\Delta h =$ variação de entalpia

$\dot{m}_c =$ vazão mássica do combustível

$\eta =$ eficiência da caldeira

$PCI =$ poder calorífico inferior

$\dot{m}_1 =$ vazão mássica de vapor da caldeira

3.4.2 Balanço de energia no Ciclo Rankine

Com a vazão mássica encontrada anteriormente, pode-se realizar os balanços de energia:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (3.17)$$

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_5 h_5 = \dot{m}_6 h_6 \quad (3.18)$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_7 \quad (3.19)$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_1 \quad (3.20)$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 \quad (3.21)$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_3 \quad (3.22)$$

$$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 + W_{turb} \quad (3.23)$$

Para encontrar as entalpias são feitas as seguintes equações:

$$\eta_{turb} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_{2s})} \quad (3.24)$$

Obtem-se h_2 a partir da equação 3.24

$$\eta_{turb} = \frac{(h_2 - h_3)}{(h_2 - h_{3s})} \quad (3.25)$$

Obtem-se h_3 a partir da equação 3.25

$$\eta_{bomb} = \frac{(h_{5s} - h_4)}{(h_5 - h_4)} \quad (3.26)$$

Obtem-se h_4 a partir da equação 3.26

$$\eta_{bomb2} = \frac{(h_{7s} - h_6)}{(h_7 - h_6)} \quad (3.27)$$

Obtem-se h_7 a partir da equação 3.27.

O trabalho realizado pelas bombas é obtido pelas equações 3.28 e 3.27.

$$W_{bomb} = \dot{m}_6(h_7 - h_6) \quad (3.28)$$

$$W_{bomb2} = \dot{m}_6(h_7 - h_6) \quad (3.27)$$

Agora é possível encontrar o trabalho realizado pelo sistema:

$$W_{sist} = W_{turb} - W_{bomb} - W_{bomb2} \quad (3.30)$$

Por último dentro do ciclo Rankine será calculado a eficiência térmica de primeira lei:

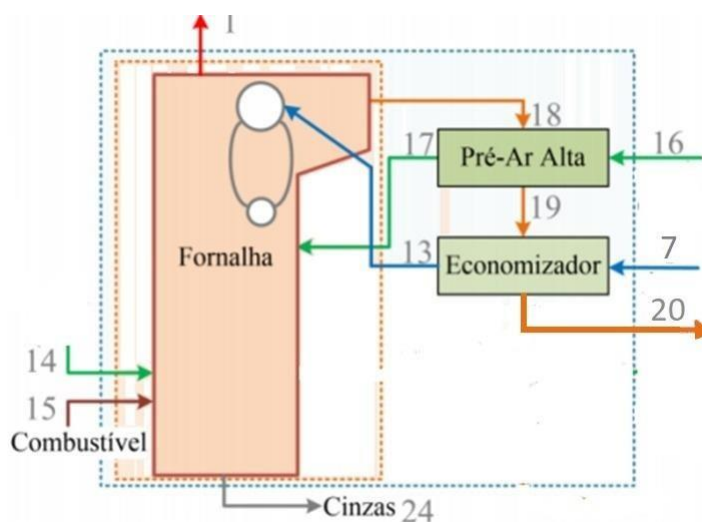
$$\eta_{sist} = \frac{W_{sist}}{\dot{m}_c \times PCI} \quad (3.31)$$

3.4.3 Modelagem da Caldeira

A caldeira é do tipo aquatubular que foi representada na Figura 5. A caldeira contém um economizador e um pré-aquecedor.

A planta da caldeira e seus componentes segue representada na Figura 21.

Figura 21: Planta da Caldeira



Para poder provar a primeira lei da termodinâmica, tudo que entra dentro da fornalha e dos trocadores de calor deve ser igual a tudo que sai.

Primeiramente o balanço de energia dentro da fornalha:

$$\begin{aligned} \dot{m}_c \times PCI + \dot{m}_{ar} \times 0,4 \times (T17 - T16) + (h13 \times \dot{m}_7) = \dot{m}_1 \times h1 + \\ \dot{m}_{gas} \times cp \times (T18 - T0) + \dot{m}_c \times cpcinza \times (1000 - T0) \times Z + Perdas \times (\dot{m}_c \times PCI + \\ \dot{m}_{ar} \times cp \times (T17 - T0)) \end{aligned} \quad (3.32)$$

O balanço de energia no pré-ar é da seguinte maneira, considerando que 40% do ar entrará pelo pré de alta, 40% pelo economizador e 20% por T14:

$$0,4 \times \dot{m}_{ar} \times cp \times (T17 - T16) = \dot{m}_{gas} \times cp \times (T18 - T19) \quad (3.33)$$

Para poder descobrir o valor que entrará pelo pré-aquecedor de alta, iguala-se a equação anterior a $Q_{prealta}$:

$$Q_{prealta} = \dot{m}_{gas} \times cp \times (T18 - T19) \quad (3.34)$$

O balanço de energia no economizador se dá da seguinte maneira:

$$0,4 \times \dot{m}_{gas} \times cp \times (T19 - T20) = \dot{m}_7 \times (h13 - h7) \quad (3.35)$$

Para descobrir o valor que entra pelo economizador, iguala-se a Q_{eco} :

$$Q_{eco} = \dot{m}_7 \times (h13 - h7) \quad (3.36)$$

3.4.4 Eficiência da Fornalha

Foi considerado inicialmente uma eficiência da fornalha de 50%.

$$\eta_{fornalha} = \frac{Q_{util}}{Q_{disp}} \quad (3.37)$$

$$Q_{disp} = \dot{m}_c \times PCI + \dot{m}_{17} \times cp \times (T17 - Tamb) \quad (3.38)$$

$$Q_{util} = Q_{disp} - (\dot{m}_{gas} \times cp \times (T18 - Tamb) + Perdas \times Q_{disp}) \quad (3.39)$$

3.5 Exergia

3.5.1 Exergia Química

Para ser realizada a análise exérgica foram utilizados alguns dados tabelados de Moran Tabela A26, nessa tabela encontra-se a exergia química padrão de alguns elementos

Tabela 4: Exergia Química Padrão

eCO ₂	14175 kJ/kmol
eH ₂ O	8635 kJ/kmol
eN ₂	640 kJ/kmol
eO ₂	3950 kJ/kmol
eSO ₂	301940 kJ/kmol

Fonte: Bejan, 1995

Para ser calculado a exergia foi necessário calcular a fração mássica em cada um dos elementos, segue abaixo as equações que foram utilizadas para o mesmo:

$$FMCO_2 = \frac{MCO_2 \times \dot{m}_c}{\dot{m}_{gas}} \quad (3.39)$$

$$FMH_2O = \frac{MH_2O \times \dot{m}_c}{\dot{m}_{gas}} \quad (3.40)$$

$$FMN_2 = \frac{N_2 \times \dot{m}_c}{\dot{m}_{gas}} \quad (3.41)$$

$$FMO_2 = \frac{O_2 \times \dot{m}_c}{\dot{m}_{gas}} \quad (3.42)$$

$$FMSO_2 = \frac{SO_2 \times \dot{m}_c}{\dot{m}_{gas}} \quad (3.43)$$

$$FMZ = \frac{Mz - 0,8 \times mcinza}{\dot{m}_{gas}} \quad (3.44)$$

$$FMtotal = FMCO_2 + FMH_2O + FMN_2 + FMO_2 + FMSO_2 + FMZ \quad (3.45)$$

FMZ é a fração mássica de cinzas.

Agora dessa maneira é possível ser calculado a exergia química:

$$e_{gas} = \frac{FMCO_2 \times eCO_2}{MMCO_2} + \frac{FMH_2O \times eH_2O}{MMH_2O} + \frac{FMN_2 \times eN_2}{MMN_2} + \frac{FMO_2 \times eO_2}{MMO_2} + \frac{FMSO_2 \times eSO_2}{MMSO_2} \quad (3.46)$$

A exergia física foi calculada em cada ponto através do programa EES, para então ser feito a análise exergética através em cada um dos equipamento que estavam contidos no ciclo, assim análise exergética na turbina se dá da seguinte maneira:

$$Ep1 = W_{turb} \quad (3.47)$$

$$\dot{E}_c1 = \dot{E}_1 - \dot{E}_2 - \dot{E}_3 \quad (3.48)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{Ep1}{E_c1} \quad (3.49)$$

De maneira análoga foi feito o cálculo para os outros equipamento do ciclo:

Fornalha:

$$\dot{E}p2 = \dot{E}_1 - \dot{E}_{13} \quad (3.50)$$

$$E_c2 = (E_{14} + E_{15} + E_{17}) - (E_{18} + E_{24}) \quad (3.51)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{Ep2}{E_c2} \quad (3.52)$$

Pré de alta:

$$\dot{E}p3 = E_{17} - \dot{E}_{16} \quad (3.53)$$

(3.53)

$$\dot{E}_c3 = \dot{E}_{18} - \dot{E}_{19} \quad (3.54)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{Ep3}{E_c3} \quad (3.55)$$

Economizador:

$$\dot{E}p4 = \dot{E}_1 - \dot{E}_7 \quad (3.56)$$

$$E_c4 = (E_{14} + E_{16} + E_{15}) - (E_{20} + E_{24}) \quad (3.57)$$

$$\varepsilon_4 = \frac{E p^4}{E_c^4} \quad (3.58)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados da combustão

4.1.1 PCSE PCI

A Tabela 5 mostra a composição química dos resíduos sólidos urbanos:

Tabela 5: Composição química dos resíduos sólidos urbanos

C	30%
H	17,56%
N	4,27%
O	10,93%
S	5,79%
Cl	0%
Z	1,46%

Fonte: GALANTE, 2019

Colocando os valores encontrados nas equações 3.1 e 3.2 :

$$PCS = 15919 \text{ kJ/kg}$$

$$PCI = 11331 \text{ kJ/kg}$$

O bagaço de cana de açúcar possui um PCI de 11000, comparando com o encontrado não possui um valor divergente, por isso o valor encontrado é plausível.

Utilizando as equações de 3.3 até 3.14 encontra-se os resultados que são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6: Resultado das vazões mássicas

\dot{m}_{total}	7,963 kg/s
$\dot{m}_{gastotal}$	8,476 kg/s
\dot{m}_{cinza}	0,007604 kg/s
\dot{m}_c	0,5208 kg/s

Fonte: Autoria própria, 2021

O sistema deve obedecer um balanço de massa, para regime permanente portanto a massa que entra, deve ser igual a massa que sai:

$$\dot{m}_a r_{total} + \dot{m}_c = \dot{m}_i gastotal + \dot{m}_i cinza$$

Substituindo os valores, encontra-se:

$$8,48 = 8,48$$

Portanto as vazões mássicas estão corretas.

As equações 3.39 até 3.44, são utilizadas para encontrar as frações mássicas apresentadas na tabela a seguir, a partir das frações mássicas é possível perceber a composição

do combustível.

Tabela 7: Resultado das frações mássicas

FMCO ₂	0,06764
FMZ	0,00018
FMH ₂ O	0,1241
FMN ₂	0,7289
FMO ₂	0,07293
FMSO ₂	0,00712

Fonte: Autoria Própria, 2021

A soma das frações mássicas sempre deve dar 1, a soma das frações encontradas foi 1, logo estão corretas.

4.2 CICLO RANKINE

A Tabela 8 mostra cada ponto do ciclo de geração de energia termoelétrica, utilizando as fórmulas de 3.17 a 3.30.

Tabela 8: Resultados do Rankine

Ponto	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg.K)	Vazão mássica (kg/s)
1	420	4200	3257	6,812	1,284
2	127,6	251	2748	7,128	0,1231
3	53,98	15	2398	8,007	1,161
4	53,98	15	226,3	0,7551	1,161
5	54	251	226,3	0,7551	1,161
6	110	251	465,6	1,431	1,284
7	110,5	4200	470,5	1,431	1,284

Fonte: Autoria Própria, 2021

Através da Equação 3.30 foi possível calcular a potência de trabalho do sistema que foi de 1060 kW e com esse resultado calcular a eficiência energética de primeira lei que deu um valor de 0,1796 ou 17,96%, valor pequeno, pois a fornalha que será mostrado os resultados a seguir consome muito dessa energia e sempre se respeita a lei da conservação de energia.

4.3 FORNALHA

Para fazer o balanço na fornalha teve que ser necessário pré-estabelecer algumas temperaturas:

Tabela 9: Temperaturas pré-estabelecidas

T0	25
T14	25
T15	25
T16	25
T18	400
T20	200

Fonte: Autoria Própria, 2021

Na Tabela 10, encontram-se os valores de eficiência para T19 variando de 320 a 200 °C.

Tabela 10: Valores de eficiência para variação T19

EFICIÊNCIA CALDEIRA	EFICIÊNCIA FORNALHA	T13°C	T17 °C	T18 °C	T19°C
0,5727	0,447	196,1	237,9	400	320
0,578	0,4516	191	254,7	400	313,7
0,5833	0,4562	185,9	271,5	400	307,4
0,5886	0,4606	181	288,3	400	301,1
0,5939	0,465	176,1	305,1	400	294,7
0,5992	0,4693	171,3	321,9	400	288,4
0,6045	0,4736	166,5	338,7	400	282,1
0,6098	0,4777	161,8	355,5	400	275,8
0,6152	0,4818	157,2	372,3	400	269,5
0,6205	0,4858	152,6	389,2	400	263,2
0,6258	0,4898	148,1	406	400	256,8
0,6311	0,4937	143,7	422,8	400	250,5
0,6364	0,4975	139,3	439,6	400	244,2
0,6417	0,5013	135	456,4	400	237,9
0,647	0,505	130,8	473,2	400	231,6
0,6524	0,5087	126,6	490	400	225,3
0,6577	0,5123	122,5	506,8	400	218,9
0,663	0,5159	118,4	523,6	400	212,6
0,6683	0,5193	114,4	540,4	400	206,3
0,6736	0,5228	110,5	557,2	400	200

Fonte: Autoria Própria, 2021

Conforme diminui T19 o T17 aumenta e chega um momento que o T17 fica maior que o T18 e isso é impossível já que o T18 é a fonte de energia do T17, o último T17 possível é 389,2 °C dando uma boa eficiência da caldeira de 0,6205 ou 62%., só que esses valores exigem um trocador de calor com uma área de troca térmica muito boa com uma diferença de temperatura muito pequena e isso pode encarecer o projeto, deve ser feita uma análise com um projetista pra ver qual variação de temperatura seria melhor, essa análise seria completa sendo feita uma análise exergoeconômica.

Pela primeira lei é esperado que a eficiência da caldeira seja maior que da fornalha, já que a caldeira recupera uma quantidade de energia que a fornalha descarta, o que foi mostrado.

4.4 Análise da eficiência exergética

Na Tabela 11 encontra-se os valor de eficiência exergética em cada equipamento do ciclo.

Tabela 11: Eficiência exergética dos equipamentos

eficiencia exergética	equipamento
0,7139	turbina
0,1995	fornalha
0,7435	pré de alta
0,1513	economizador
0,1973	caldeira completa

Fonte: Autoria Própria, 2021

A exergia é o potencial de realização de trabalho máximo a partir de uma certa configuração do sistema e do ambiente, ou seja, o que a eficiência exergética diz é quão bom o equipamento é em converter o combustível em produto, então a fornalha já era esperado que a eficiência exergética fosse baixa, porque ela destrói muita exergia do combustível, o combustível tem um potencial de exergia muito alto, porém não é possível aproveitar toda essa exergia, pois não é possível deixar as temperaturas tão elevadas e o produto que a caldeira gera é um produto de temperaturas relativamente baixas, então é por isso que a fornalha possui uma das menores eficiências exergéticas do sistema.

O interessante da utilização dos trocadores de calor é a maior recuperação de exergia feita pela caldeira. Esses trocadores permitem recuperar 38% da exergia que seria descartada pela fornalha.

4.4.1 Eficiência exergética produtos e combustível

Na Tabela 12 encontram-se os valor de eficiência exergética da fornalha e caldeira para combustível e produto.

Tabela 12: Eficiência exergética produto e combustível

	fornalha	caldeira
produto	1439	1520
combustível	7216	7701

Fonte: Autoria Própria, 2021

O produto da caldeira é apenas um pouco maior do que o produto da fornalha, já que a variação de exergia do produto é maior na caldeira do que na fornalha. Mas a variação de exergia do combustível da caldeira é significativamente maior do que o combustível da

fornalha, já que mais exergia é resgatada pelos trocadores de calor.

5. CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi modelado uma caldeira tendo como combustível a produção de RSU de Guarapuava.

O primeiro objetivo era quantificar a produção de RSU em Guarapuava e isso foi realizado com base nos dados fornecidos pelo encarregado na coleta de Resíduos Sólidos de Guarapuava, a partir disso pode ser observado que Guarapuava possui uma alta produção de RSU, que é de 100 toneladas por dia, descartando orgânicos por causa da sua alta umidade e descartando também os metais e vidros pelo alto teor de dioxinas, o que pode ser queimado são 45 toneladas, o que gerou uma vazão massica de 1,875ton/h.

O segundo objetivo era modelar a combustão, que foi modelada e foi descoberto um PCI de 11331 kJ/kg, um valor plausível considerando outros PCI como o de bagaço de cana de açúcar que possui um PCI de 11000kJ/kg, na fundamentação teórica foi colocado alguns filtros que podem ser utilizados, o filtro mangas é extremamente popular na indústria, mas para partículas muito pequenas é recomendado o precipitador eletrostático.

O último objetivo era modelar um sistema de geração termoelétrica com base na produção de RSU da cidade, foi realizado o mesmo e visto que pra ter uma alta eficiência energética da caldeira, no caso de 62,05% é necessário um trocador de calor com uma área de troca térmica muito boa com uma diferença de temperatura muito pequena que pode vir a encarecer o projeto, uma eficiência um pouco mais baixa de 60,98%, às vezes seria melhor economicamente, fica aqui uma sugestão para trabalhos futuros de qual trocador de calor seria melhor a longo prazo.

Conclui-se que Guarapuava, tem a capacidade necessária para gerar energia através de RSU, no caso uma caldeira com uma potência de 1MW.

REFERÊNCIAS

- ARWEK (Brasil). **Precipitador Eletrostático**. Disponível em: <https://arwek.com.br/PROFISSIONAL/FILTRO-ELETROSTATICO>. Acesso em: 17 jul. 2021.
- AVAC. **Filtros de Manga - Jato Pulsante**. 2021. Disponível em: <https://www.avac.ind.br/filtrosManga.aspx>. Acesso em: 02 dez. 2021.
- BEJAN, Adrian; TSATSARONIS, George; MORAN, Michael. **Thermal Design and Optimization**. Nova York: United States Copyright, 1996.
- BERMO. **Trocador de Calor a Placas Gaxetado**. 2021. Disponível em: <https://bermo.com.br/produtos/detalhes/bp6-trocador-de-calor-a-placas-gaxetado/>. Acesso em: 03 dez. 2021.
- BERTICELLI, Retielli; PANDOLFO, Adalberto; KORF, Eduardo Pavan. **GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: PERSPECTIVAS E DESAFIOS**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/318217988_GESTAO_INTEGRADA_DE_RESIDUOS_SOLIDOS_URBANOS_PERSPECTIVAS_E_DESAFIOS. Acesso em: 03 dez. 2021.
- BRITO, Adailton Pereira de. **ANÁLISE ECONÔMICA PRELIMINAR DA IMPLANTAÇÃO DE INCINERADOR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA REGIÃO DE BAURU**. 2013. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2013.
- COSTA, Araujo. **Principais Tipos de Trocadores de Calor**. 2021. Disponível em: <https://metalica.com.br/principais-tipos-de-trocadores-de-calor-2/>. Acesso em: 03 dez. 2021.
- COELHO, Pedro. **Ciclones industriais - Separadores ciclônicos**. 2012. Disponível em: <https://www.engquimicasantosp.com.br/2012/07/ciclones-industriais.html>. Acesso em: 03 nov. 2021.
- DELTA DUCON (São Paulo). **Filtro de Mangas**. Disponível em: <http://www.filtrodemangas.com/>. Acesso em: 14 jul. 2021.

DOMINGUES, Marcela Alves. **ANÁLISE EXERGÉTICA DE UMA PLANTA DE HÍBRIDA SOLAR/BIOMASSA**. 2020. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2020.

GALANTE, Renan Manozzo. **ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO TERMoeCONÔMICA DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA POR INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS COM FILTRO BIOLÓGICO E EMISSÕES**. 2019. 126 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

LEMONS Luís Teixeira de. **INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: QUAL A MELHOR OPÇÃO DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO** [Periódico]. - [s.l.] : MILLENIUM, 1997.

MAGAZONI, Felipe Costa. **Modelagem computacional do desempenho térmico de trocadores de calor de fluxo cruzado e casco e tubos**. 2016. 277 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

MAZIOLI, Jessica. **ANÁLISE DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA USANDO RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: ESTUDOS DE CASO**. 2019. 86 f. TCC (Graduação) Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

Menezes Ricardo Amaral, Gerlach Luiz José e Menezes Antônio Marcos. **ESTÁGIO ATUAL DA INCINERAÇÃO NO BRASIL** [Conferência] // VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública. - Curitiba : [s.n.], 2000.

MIYAKE, Raphael Guardini. **Análise termodinâmica e de transferência de calor em um gerador de vapor a carvão pulverizado e palha de arroz**. 2011. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

MIZIARA, Rosana. **POR UMA HISTÓRIA DO LIXO**. 2008. Disponível em: <http://www3.sp.senac.br/HOTSITES/BLOGS/INTERFACEHS/WP-CONTENT/UPLOADS/2013/07/ART-6-2008-6.PDF>. Acesso em: 27 jul. 2021.

MORAN, MICHAEL J.; SHAPIRO, HOWARD N.; BOETTNER, DAISIE D.; BAILEY,

MARGARET

B. PRINCÍPIOS DE TERMODINÂMICA PARA ENGENHARIA. 8. ED. RIO DE JANEIRO: GRUPOEDITORIAL NACIONAL, 2018.

PAUL HOCKENOS (Alemanha). **Waste to Energy-Controversial power generation by incineration.** 2021. Disponível em: <https://www.cleanenergywire.org/FACTSHEETS/WASTE-ENERGY-CONTROVERSIAL-POWER-GENERATION-INCINERATION>. Acesso em: 14 jul. 2021.

PIRES, Yolanda; OLIVEIRA, Nelson. **Aumento da produção de lixo no Brasil requer ação governada entre governo e cooperativas de catadores.** 2021. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/infomaterias/2021/06/aumento-da-producao-de-lixo-no-brasil-requer-acao-coordenada-entre-governos-e-cooperativas-de-catadores>. Acesso em: 08 ago. 2021.

SANTOS, Carlos Alberto Frantz dos. **Resíduos Sólidos Urbanos.** 2021. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/gps/pesquisa/rsu>. Acesso em: 08 ago. 2021

SCARLAT, Nicolae; FAHL, Fernando; DALLEMAND, Jean-François. **Status and Opportunities for Energy Recovery from Municipal Solid Waste in Europe.** 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-018-0297-7>. Acesso em: 08 ago. 2021.

UIEDA, Fernando Akira. **PROJETO BÁSICO DE CENTRAL TERMELÉTRICA COM INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.** 2009. 93 f. TCC (Graduação) -Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A.. **Termodinâmica.** 7. ed. Porto Alegre: Abdr, 2013.

HENDGES, Antonio Silvio. **Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.** Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2021/06/29/composicao-gravimetrica-dos-residuos-solidos-urbanos-no-brasil/>. Acesso em: 27 nov. 2021.

MENDES, Luiz Gustavo Galhardo. **Proposta de um sistema para aproveitamento energético de um aterro sanitário regional na cidade de Guaratinguetá.** 2005. 179 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 2005.

VILELA, Nathane Manuelle Silva. **COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE COMPOSTAGEM POR LEIRAS ESTÁTICAS AERADAS E POR REVIRAMENTO NO TRATAMENTO DA FRAÇÃO ORGÂNICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**. 2019. 111 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

FIGUEIREDO, Natalie Jimenez Verdi de. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica - estudo de caso**. 2011. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

TOGAWA, Victor. **Os Principais Tipos de Caldeiras**. Disponível em: <https://togawaengenharia.com.br/blog/os-principais-tipos-de-caldeiras/>. Acesso em: 02 nov. 2021.

JUCÁ, José Fernando; LIMA, José Dantas de; MARIANO, Maria; LUCENA, Luciana Figueiredo Lopes. Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão. **Tecnologias de Tratamentos de Resíduos Sólidos**, Recife, v. 1, n. 1, p. 15-189, 03 dez. 2021.

SEMASA. **Escolas municipais vão ganhar composteiras em 2015**. 2014. Disponível em: <http://www.semasa.sp.gov.br/2014/11/29/escolas-municipais-vaoganharc composteiras-em-2015/>. Acesso em: 03 dez. 2021.

NAVETHERM. **Home » Indústria de Incineradores para Resíduos Sólidos + Indústria de Incineradores para Resíduos Sólidos**. Disponível em: <https://www.navetherm.com.br/industria-incineradores-residuos-solidos.php>. Acesso em: 03 dez. 2021.