

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE ENERGÉTICA DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

MARCOS ANTÔNIO DE SOUZA JÚNIOR

Uberlândia-MG

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARCOS ANTÔNIO DE SOUZA JÚNIOR

ANÁLISE ENERGÉTICA DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
Mecânica como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Valério Luiz Borges

Uberlândia-MG

2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Marcos e Dorcelina, por tudo que fizeram por mim ao longo de todos esses anos e que permitiram que eu chegasse até aqui.

Agradeço aos meus amigos da universidade, Antônio César, Hélio Alves, Elias Guimarães e Gabriel Souza, que me apoiaram ao longo de toda a minha trajetória acadêmica e hoje me apoiam também na minha vida.

Gostaria de agradecer aos meus amigos Alysson Silva, Vitor Cokely, Breno Henrique, Ana Carolina, que foram importantes para meu crescimento ao longo de diferentes etapas da minha vida, permitindo que eu me tornasse aos poucos uma pessoa melhor.

Agradeço também a Aimirim, empresa na qual eu trabalho e aos meus colegas, Pedro Ricardo, Felipe Adriano e Renato Pacheco por todo o apoio durante a minha jornada profissional, permitindo que eu pudesse desenvolver minhas habilidades e aplicar tudo aquilo que aprendi durante a graduação.

Quero agradecer ao professor Dr. Valério Luiz Borges pela orientação e oportunidade neste trabalho.

Finalmente, também agradeço à pessoa que trouxe tanta luz para a minha vida ao longo dos últimos dois anos, Francinne Willon. Muito obrigado por me ajudar a passar por tantos momentos difíceis sem perder a esperança.

RESUMO

Este estudo tem como intuito fazer uma análise da incineração de resíduos sólidos urbanos, adotando uma abordagem termodinâmica para determinar o desempenho e a eficiência associados, com o intuito de avaliar a viabilidade dessa tecnologia. A incineração tem sido uma alternativa extensivamente empregada na gestão de resíduos urbanos, e a compreensão do ciclo termodinâmico associado é fundamental para aprimorar processos e maximizar a eficiência. A cidade de Uberlândia-MG foi escolhida como cenário para esta análise, culminando na construção de um ciclo termodinâmico alinhado com a realidade local. A análise abordada explora os elementos termodinâmicos inerentes à incineração, considerando a eficiência energética do ciclo, a produção de vapor e o potencial de geração de energia. Este enfoque visa não apenas compreender a tecnologia em si, mas também aferir sua aplicabilidade prática em um contexto específico, contribuindo assim para a identificação de oportunidades de otimização e melhorias na gestão de resíduos urbanos.

Palavras-chave: incineração, resíduos sólidos urbanos, energia

ABSTRACT

This study aims to analyze the incineration of urban solid waste, adopting a thermodynamic approach to assess the associated performance and efficiency, with the purpose of evaluating the feasibility of this technology. Incineration has been a widely employed alternative in urban waste management, and understanding the associated thermodynamic cycle is crucial for refining processes and maximizing efficiency. The city of Uberlândia-MG was chosen as the setting for this analysis, resulting in the development of a thermodynamic cycle tailored to the local reality. The presented analysis explores the thermodynamic elements inherent to incineration, considering the energy efficiency of the cycle, steam production, and the potential for power generation. This approach aims not only to comprehend the technology itself but also to gauge its practical applicability in a specific context, contributing to the identification of optimization opportunities and improvements in urban waste management.

Keywords: incineration, urban solid waste, energy

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. OFERTA INTERNA DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE.....	8
FIGURA 2. COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DO RSU DE ACORDO COM O NÍVEL DE RENDA.....	12
FIGURA 3. PARTICIPAÇÃO DAS REGIÕES DO PAÍS NO TOTAL DE RSU COLETADO.	13
FIGURA 4. COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RSU NO BRASIL.	14
FIGURA 5. COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RSU EM UBERLÂNDIA.....	15
FIGURA 6. DISPOSIÇÃO FINAL DE RSU DE ACORDO COM O NÍVEL DE RENDA.	16
FIGURA 7. TRATAMENTOS TÉRMICOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE CDR.	19
FIGURA 8. CICLO RANKINE REGENATIVO A SER ANALISADO.....	23

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DO RSU DE UBERLÂNDIA-MG	31
TABELA 2. PCI DOS DIFERENTES COMPONENTES DO RSU.	31
TABELA 3. PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DE CADA PONTO DO CICLO ANALISADO.....	33
TABELA 4. VAZÃO MÁSSICA DE CADA PONTO DO CICLO ANALISADO.....	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 - GESTÃO DE RSU	11
2.1.1 - <i>Panorama Internacional da Gestão de RSU</i>	11
2.1.2 - <i>Panorama Nacional da Gestão de RSU</i>	12
2.1.3 - <i>Panorama da Gestão de RSU em Uberlândia-MG</i>	14
2.2 - DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS:	15
2.2.1 - <i>Lixão</i>	16
2.2.2 - <i>Aterro Controlado</i>	17
2.2.3 - <i>Aterro Sanitário</i>	17
2.3 - TRATAMENTOS TÉRMICOS	18
2.3.1 - <i>Incineração</i>	19
2.3.2 - <i>Pirólise e Gaseificação</i>	20
2.3.3 - <i>Combustível Derivado de Resíduo (CDR)</i>	21
3. METODOLOGIA	23
3.1 - PREMISSAS:	24
3.2 – ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS:	24
3.3 – BALANÇO DE MASSA E ENERGIA:	27
3.4 - PODER CALORÍFICO DO RSU	30
4. RESULTADOS	33
5. CONCLUSÃO	36
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
APÊNDICE A: MEMORIAL DE CÁLCULO	40

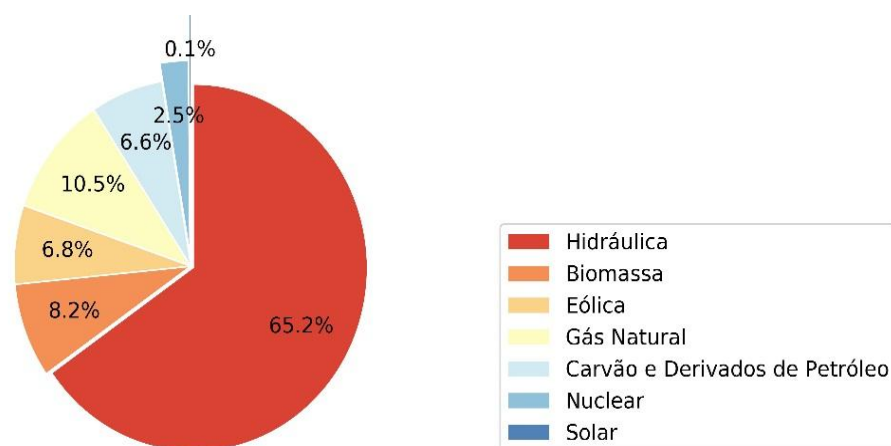
CARACTERIZAÇÃO DO CDR

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais, é evidente que a sociedade contemporânea está imersa em um ritmo acelerado de avanços tecnológicos. Embora esses avanços tenham proporcionado inúmeros benefícios para o nosso cotidiano, também resultaram em um crescimento urbano desordenado, especialmente nos países em desenvolvimento. Como consequência, observa-se um aumento desenfreado na demanda por recursos e na geração de resíduos nas cidades, tornando essa realidade insustentável do ponto de vista socioambiental.

Em contrapartida, ao longo deste período também surgiu uma tendência ao estudo e adoção de medidas que visam o desenvolvimento sustentável tanto no Brasil quanto no resto do mundo. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) realizou o Balanço Energético Nacional (EPE, 2018) apresentado na Figura 1, mostra que o Brasil tem uma matriz energética composta majoritariamente por fontes renováveis como: hidráulica, solar, eólica e biomassa.

Figura 1. Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.



Fonte: (Baseado em EPE, 2018)

Entretanto, apesar do Brasil apresentar uma matriz energética com uma grande parcela de fontes renováveis, não significa que não seja possível caminhar em direção a uma energia ainda mais sustentável. Muitos estudos recentes vêm mostrando novas possibilidades para a produção de energia de forma mais

sustentável, uma delas, que será o foco deste trabalho é a energia produzida através de resíduos sólidos, sejam eles resíduos sólidos urbanos ou provenientes de outros tipos de atividade. Essa solução permite trabalhar simultaneamente em dois problemas socioambientais, já que permitirá o reaproveitamento dos resíduos sólidos ao mesmo tempo que possibilitará um aumento da capacidade de produção energética do país.

A maior vantagem da utilização de resíduos sólidos para a geração de energia é o fato de que as tecnologias utilizadas apresentam forte economia de escala, o que significa que o investimento por unidade de insumo e as eficiências de conversão aumentam com a capacidade (FEAM, 2012).

A Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010), também conhecida como Política Nacional de Resíduos Sólidos, prevê que cada município é responsável pela gestão dos resíduos sólidos gerados no seu território. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é estudar os resíduos sólidos urbanos, verificando qual o destino atual destes resíduos e estudando a possibilidade de reaproveitamento dos mesmos para a geração de energia elétrica.

Existem diferentes tecnologias que permitem a transformação de RSU em energia, iremos dividir estas possibilidades de acordo com os processos utilizados, sendo eles térmicos ou biológicos. Entre os processos térmicos, pode-se citar: incineração, pirólise, gaseificação, entre outros. Já para os processos biológicos, pode-se destacar a utilização de biogás proveniente da biometanização de resíduos, que pode ser feita em reatores anaeróbicos ou através da captura do gás em aterros sanitários.

O intuito desse trabalho será de referenciar diferentes rotas tecnológicas para o aproveitamento energético de RSU e a partir disso determinar a viabilidade da implementação de um processo de incineração de RSU no município de Uberlândia-MG.

Para justificar a importância do desenvolvimento de novas tecnologias na área energética, podemos citar (CONER, 2007):

Estudos referentes à Matriz Energética de Minas Gerais 2007 – 2030 estimam que, no longo prazo, o alto preço da energia e a escassez de

outras opções de geração poderão viabilizar, além do aproveitamento do potencial eólico, a incineração de resíduos sólidos urbanos, representando esta, em 2030, um acréscimo de capacidade quase equivalente a uma hidrelétrica de grande porte (293 MW), além de oferecer uma possibilidade de disposição final dos resíduos com importantes vantagens ambientais.

Além disso, para ressaltar a importância do estudo do reaproveitamento energético de RSU, podemos citar (MENEZES, Gerlach, & Menezes, 2000):

No Brasil deveríamos já estar considerando a implantação de termelétricas a gás e lixo e, desta forma buscarmos equacionar ambos os problemas: de energia e do tratamento ambientalmente correto do lixo, para atender as exigências do meio ambiente. Não é concebível hoje um projeto de tratamento de RSU sem a reciclagem de energia. Em números aproximados pode-se afirmar que 1 tonelada de RSU equivale a 200 kg de carvão ou 250 kg de combustível, 30 t de água quente ou ainda 500 kWh de energia elétrica. O calor recuperado pela incineração pode representar cerca de 6 a 7 % da energia consumida pela população que gera o RSU[...]

Com base nisso, podemos dizer que existe uma tendência para a construção de cada vez mais instalações para reaproveitamento energético de resíduos. A energia gerada pode ser utilizada em prédios do governo como prefeituras, hospitais públicos e universidades, possibilitando uma economia considerável para os cofres públicos. Caso seja feito pela iniciativa privada, pode ser utilizada para a venda de energia. Portanto, a motivação deste trabalho é entender como os Resíduos Sólidos Urbanos podem ser reaproveitados da melhor forma possível.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Antes de dar início ao trabalho, é importante que sejam feitas algumas observações preliminares, assim como a explicação de alguns termos que serão utilizados ao longo do decorrer do trabalho. Sendo assim, foram feitas pesquisas referentes a gestão de resíduos em diferentes localidades, mostrando as diferentes rotas para a disposição e tratamento destes resíduos.

2.1 - GESTÃO DE RSU

Primeiramente, deve-se definir os chamados resíduos sólidos urbanos (RSU), que são resíduos provenientes de atividades domésticas e procedentes da limpeza urbana. A composição e as propriedades deste tipo de resíduo variam de acordo com a localização, época do ano, entre outros fatores. Além dos RSU, também existem outros tipos de resíduos como: resíduos industriais, resíduos de serviços de saúde, resíduos provenientes de estações de tratamento, resíduos de atividades agrícolas, entre outros. Este trabalho irá focar principalmente nos resíduos sólidos urbanos e nas formas de reaproveitamento dos mesmos.

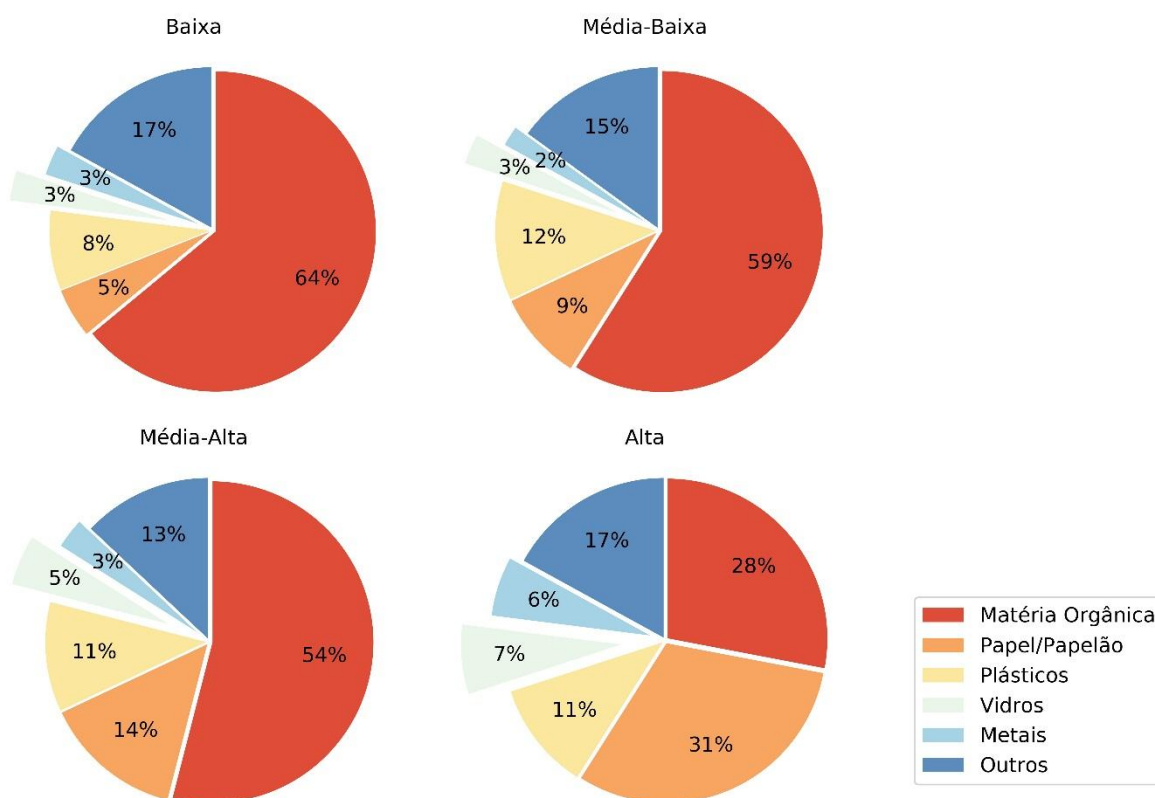
Para determinar a qualidade de determinada amostra de resíduos sólidos é possível fazer uma análise da composição gravimétrica, que representa a quantidade percentual de cada componente (metal, plástico, matéria orgânica, etc.) em relação ao peso total da amostra. Sendo assim, a composição gravimétrica permite estimar o potencial energético dos resíduos em processos térmicos e portanto, é essencial para determinar a viabilidade destes processos.

2.1.1 - Panorama Internacional da Gestão de RSU

É importante ressaltar que a composição gravimétrica dos RSU depende dos hábitos de consumo da população, que estão atrelados a diversos fatores, entre eles: nível de renda, região analisada, época do ano, entre outros. Entre esses fatores, um dos mais importante é o nível de renda, sendo que regiões com renda mais alta tem uma tendência a apresentarem RSU com menor quantidade percentual de matéria orgânica, que é substituída por papel, papelão e plástico. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a composição gravimétrica de RSU de acordo com o Nível

de Renda baseado em um estudo do World Bank Group feito com diversos países do mundo.

Figura 2. Composição Gravimétrica do RSU de acordo com o Nível de Renda.



Fonte: (HOORNWEG & BHADA-TATA, 2012).

Para reaproveitamento energético de RSU, é desejável uma composição gravimétrica mais próxima daquela dos países de Alta Renda, isso se deve ao fato de que o papel, papelão e plástico apresentam um poder calorífico consideravelmente mais alto do que matéria orgânica, que normalmente apresenta altos teores de umidade.

2.1.2 - Panorama Nacional da Gestão de RSU

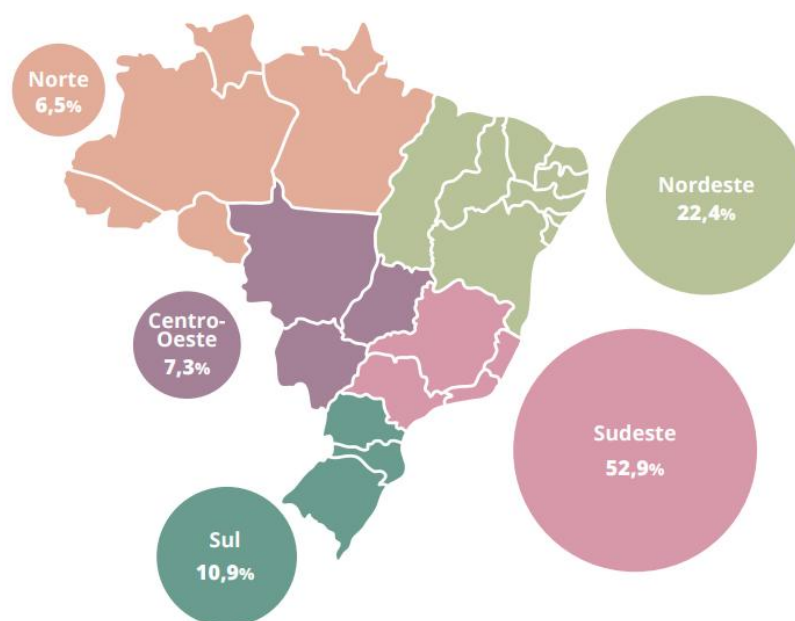
Com base Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), existem vários princípios orientadores que visam melhorar a gestão dos Resíduos Sólidos, entre eles: redução, não geração, reutilização e reaproveitamento, reciclagem, tratamento dos resíduos e disposição final ambientalmente adequada. Sendo assim, este trabalho visa permitir o reaproveitamento de resíduos para a produção de

energia, sendo assim, estará contribuindo para as propostas de melhoria já feitas pelo governo estadual.

Com base no relatório da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2018), tem-se que no ano de 2017 foram produzidos um total de 78,4 milhões de toneladas de RSU em todo o país, dos quais 91,2% foram coletados. Entretanto, um ponto preocupante é o fato de que mais de 29 milhões de toneladas de resíduos foram despejados em locais inadequados, em lixões ou aterros que não estão dentro dos regulamentos ambientais, trazendo sérios riscos ao meio ambiente e à saúde das pessoas.

Outro ponto importante, que pode ser observado na Figura 3, é que 52,9% do RSU coletado no país é proveniente da Região Sudeste. Isso mostra que a região está produzindo grandes quantidades de resíduos diariamente.

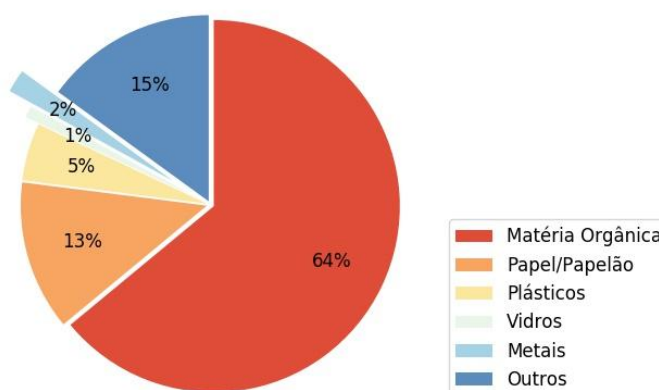
Figura 3. Participação das regiões do país no total de RSU coletado.



Fonte: (ABRELPE, 2018)

A alta densidade urbana causa um grande problema relacionado à falta de espaço adequado para o descarte dos resíduos gerados na região, mostrando mais uma vez a relevância do desenvolvimento de métodos para o reaproveitamento de diferentes tipos de resíduos. A Figura 4 apresenta a composição gravimétrica dos RSU no Brasil (FEAM, 2012).

Figura 4. Composição gravimétrica dos RSU no Brasil.



Fonte: (FEAM, 2012).

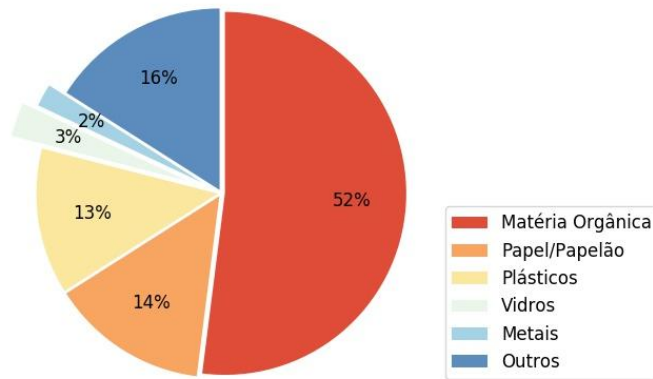
2.1.3 - Panorama da Gestão de RSU em Uberlândia-MG

A cidade de Uberlândia se localiza na Região Sudeste do Brasil, no Estado de Minas Gerais, na Região do Triângulo Mineiro. A cidade possui uma área de unidade territorial de 4.115,206 km², e uma população estimada de 691.305 habitantes (IBGE, Coordenação de População e Indicadores Sociais, 2019).

Desde o ano de 2017, o Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) é responsável pela coleta de resíduos sólidos na cidade de Uberlândia. Com base no relatório quantitativo da coleta de resíduos (IBGE, Coleta de Resíduos, 2019), foram coletados um total de 194 mil toneladas de resíduos sólidos no ano de 2018 no município de Uberlândia, o que significa uma média de 533 toneladas por dia. No ano de 2011, foi iniciado o programa de Coleta Seletiva nos bairros Santa Mônica e Segismundo Pereira, atualmente, o serviço atende um total de 29 dos mais de 70 bairros dentro do perímetro urbano.

Quanto à composição gravimétrica dos resíduos sólidos em Uberlândia, podemos verificar pela Figura 5 que existe uma porcentagem menor de matéria orgânica (que possui alta umidade), porém uma boa quantidade de papel/papelão e plásticos, o que indica que a cidade apresenta resíduos de boa qualidade para reaproveitamento energético.

Figura 5. Composição Gravimétrica dos RSU em Uberlândia.



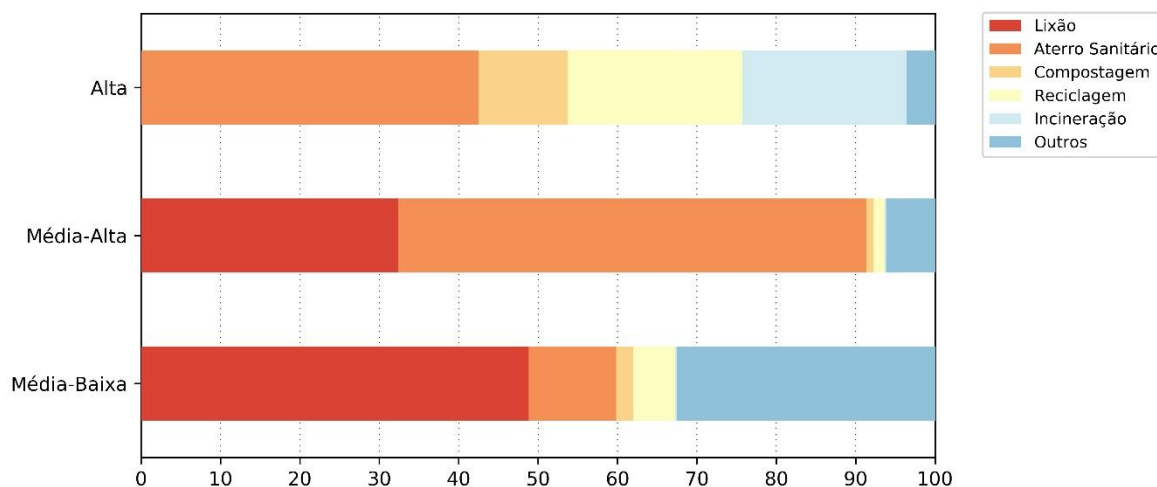
Fonte: (DMAE, 2019)

Com base nas observações preliminares sobre os resíduos sólidos urbanos no município de Uberlândia, é possível concluir que existe um bom potencial para aproveitamento energético. Ao longo do trabalho, serão analisadas também outros tipos de resíduos, assim como as técnicas utilizadas para o aproveitamento energético dos mesmos de forma a demonstrar a viabilidade da aplicação de alguma dessas tecnologia na cidade de Uberlândia-MG.

2.2 - DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS:

Com o aumento da geração de resíduos surge também a preocupação com a gestão adequada dos mesmos. Em geral, uma má gestão dos RSU causa impactos negativos para o meio ambiente, a saúde da população e a economia da região. Em geral, com o enriquecimento da população é possível observar uma tendência pela eliminação de lixões, que em parte são substituídos por aterros sanitários, representando uma forma mais limpa para o descarte dos RSU. A Figura 6 mostra a destinação final de RSU de acordo com o Nível de Renda baseado em um estudo do World Bank Group feito com diversos países do mundo. (HOORNWEG & BHADATATA, 2012)

Figura 6. Disposição Final de RSU de acordo com o Nível de Renda.



Fonte: (HOORNWEG & BHADA-TATA, 2012)

Além disso, também é possível observar que países de Alta Renda apresentam um maior percentual de adoção de técnicas de reutilização dos resíduos, como: compostagem, reciclagem e incineração. Ao longo deste capítulo, serão abordados estes diferentes métodos para destinação final dos resíduos sólidos.

2.2.1 - Lixão

De acordo com (NASCIMENTO, 2007), um Lixão é definido da seguinte forma:

É uma forma de disposição final dos RSU, na qual estes são lançados sobre o solo, sem qualquer medida de proteção ao meio ambiente ou a saúde pública. Não existem controles sobre o tipo, volume ou grau de periculosidade dos resíduos depositados. Os resíduos são simplesmente lançados sobre o solo natural sem receber qualquer tipo de tratamento mecânico para redução de seu volume.

Através desta definição, é possível entender os riscos envolvidos no descarte de RSU em lixões. Os resíduos não são previamente analisados e são lançados ao solo sem levar em consideração o grau de poluição que poderá ser causado ao longo da decomposição dos resíduos que acabam contaminando o solo e conseqüentemente as águas subterrâneas. Além disso, alguns tipos de resíduos, especialmente os de origem orgânica, podem atrair animais e vetores de doenças, caracterizando um risco à saúde da população.

2.2.2 - Aterro Controlado

De acordo com a norma NBR 8849 do ano de 1985, os aterros controlados representam outro método para a destinação final dos RSU, preferível em relação aos lixões. Um aterro controlado é um local previamente preparado para receber resíduos sólidos. Nos lixões, os resíduos são apenas descartados no solo, já nos aterros controlados, eles são dispostos sobre o solo e em seguida aterrados com uma camada de material inerte, geralmente terra, argila e grama. (ABNT, 1985)

Muitas vezes convertidos a partir de antigos lixões, nos aterros controlados não existe tratamento do lixo descartado e ainda existe o risco de contaminação do solo através do vazamento de efluentes (chorume) que infiltram no solo e escoam livremente para as águas subterrâneas. Sendo assim, os aterros controlados ainda caracterizam um risco ambiental. (WALDMAN, 2010)

2.2.3 - Aterro Sanitário

Os aterros sanitários são um método para a disposição dos RSU que apresenta menos impactos negativos do que as opções anteriores. De acordo com a norma NBR 8419 (ABNT, 1992) um aterro sanitário é definido como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

De acordo com a norma, um aterro sanitário deve apresentar algumas características técnicas: sistema de drenagem do biogás proveniente da decomposição dos resíduos, sistema de coleta de chorume para evitar contaminação, sistema de drenagem de águas pluviais que infiltram no aterro e podem causar aumento da produção de chorume e instabilidade do aterro, impermeabilização inferior (base do aterro), além disso, o chorume coletado no aterro deve ser tratado antes de ser descartado.

Durante a decomposição dos resíduos, ocorre a produção de biogás devido à digestão anaeróbia. O gás produzido contém cerca de 54% de CH₄ e 46% de CO₂ além de vapor d'água, amônia, gás sulfídrico e outros constituintes. (ENGEBIO, 2010)

De acordo com (ICLEI, 2009) a maioria dos aterros no Brasil utiliza drenos abertos, onde se mantém uma chama acesa para a queima imediata do biogás enquanto vai sendo drenado. O problema desta prática é o fato de que apenas 20% do biogás é efetivamente queimado e o restante é emitido para a atmosfera. O biogás é considerado um gás causador do efeito estufa por ser constituído por metano e dióxido de carbono, portanto, idealmente deve ser realizada a captação forçada do biogás permitindo o reaproveitamento energético do mesmo e evitando que ele seja emitido para a atmosfera.

Por último, sabe-se que ao final da vida útil de um aterro sanitário, após a estabilização dos processos de decomposição e acomodação das camadas de terra, o terreno pode ser utilizado para novos fins, desde que respeitadas as devidas medidas de segurança quanto ao estudo do solo e da possibilidade de infiltração de gases combustíveis.

De acordo com (WALDMAN, 2010) apesar de seus pontos positivos, os aterros sanitários também apresentam alguns problemas que devem ser endereçados. Primeiramente, os aterros sanitários exigem terrenos vastos, investimento alto e seu fim é apenas enterrar recursos advindos do trabalho humano que ainda poderiam ser reaproveitados, trata-se de uma inconsistência evidente. Além disso, ainda existe a possibilidade de impactos ambientais, entre eles: a possibilidade da migração do chorume para fora do aterro, surgimento de fissuras de biogás, rupturas, escorregamentos, entre outros.

2.3 - TRATAMENTOS TÉRMICOS

Como já dito anteriormente, o aumento da densidade populacional causa um crescimento na geração de resíduos sólidos, além de uma grande demanda de energia elétrica, uma solução para ambos os problemas é reaproveitar os resíduos para a geração de energia elétrica através de tratamentos térmicos. Existem diferentes técnicas para o tratamento de RSU, entre as principais temos: pirólise,

gaseificação e incineração. Conforme Figura 7 é possível verificar que as duas principais diferenças entre as técnicas são: temperatura e quantidade de oxigênio.

Figura 7. Tratamentos térmicos para a geração de energia através de CDR.



Fonte: (CARVALHO, TAVARES, SANTOS, & BAJAY, 2019)

Os processos de pirólise e gaseificação produzem gás sintético (syngas) que por sua vez é utilizado para produzir gás natural e/ou energia elétrica. Já a incineração apenas produz energia térmica que por sua vez pode ser convertida em eletricidade através de um ciclo geração de energia.

Os processos térmicos citados apresentam as seguintes vantagens: redução do volume de resíduos a serem depositados em aterros sanitários, redução da emissão de gás metano (quando comparados ao processo de biometanização) e a não geração de chorume, contribuindo para evitar a contaminação do solo e da água. Entretanto, no caso da incineração, existe uma preocupação em relação à emissão de gases tóxicos e poluentes. Já a pirólise, apresenta muitas vantagens claras, entre elas o fato de que os gases produzidos podem ser armazenados e utilizados conforme demanda e a menor emissão de gases poluentes. (FEAM, 2012) O maior problema do processo de pirólise é a necessidade de um controle adequado do processo devido à heterogeneidade do combustível, justificando a necessidade do estudo mais aprofundado das diferentes técnicas para tratamento térmico de resíduos sólidos.

2.3.1 - Incineração

A incineração é um método de tratamento térmico bastante disseminado e que consiste em um processo de combustão dos resíduos em temperaturas acima

dos 850 °C e com excesso de oxigênio, suficiente para a plena oxidação (CARVALHO, TAVARES, SANTOS, & BAJAY, 2019).

Como já se sabe, o processo de incineração produz gases de efeito estufa e outros componentes que podem ser maléficos para o meio ambiente e para a saúde humana, como o CO_2 , CO , NO_x , dioxinas, entre outros. Por motivos óbvios, é importante que exista um processo para o tratamento desses gases, por isso, com o desenvolvimento das leis ambientais, muitos incineradores antigos foram desativados. Em contrapartida, a incineração de resíduos pode ser ambientalmente correta e sustentável caso seja feita de forma controlada, por uma equipe qualificada e de acordo com as exigências técnicas operacionais e ambientais.

De acordo com essa definição, a incineração de resíduos sólidos já vem sendo utilizada a algum tempo, inicialmente, sua função era apenas de reduzir o volume do lixo, segundo (MORGADO & FERREIRA, 2006, p. 4):

A incineração tem sido utilizada como um método para processar resíduos desde o início do século XVIII. [...] O primeiro incinerador municipal no Brasil foi instalado em 1896 em Manaus para processar 60 toneladas por dia de lixo doméstico, tendo sido desativado somente em 1958 por problemas de manutenção. [...] A partir de 1970 foi iniciada a fase de implantação de incineradores especificamente desenvolvidos para o tratamento de resíduos especiais, como: aeroportuários, hospitalares, industriais e outros perigosos.

Quanto ao reaproveitamento energético, a incineração deve ser feita dentro de uma câmara controlada, onde o calor produzido poderá ser utilizado em um ciclo de geração de energia. Existem diversas configurações para fornos de incineração: combustão em grelha, leito fluidizado, forno rotativo, câmaras múltiplas. Uma das maiores vantagens da incineração em relação à utilização de biogás proveniente de aterros sanitários é a possibilidade de queima de papéis e plásticos, garantindo um maior reaproveitamento energético.

2.3.2 - Pirólise e Gaseificação

Conforme (SHAFIZADEH, 1982) pirólise é o processo de conversão térmica de materiais orgânicos através do uso de um catalisador e na ausência de oxigênio. Este processo gera calor, além de produzir gases não condensáveis, entre eles o syngas, assim como líquido pirolenhoso, por último, também é gerado um resíduo

sólido constituído principalmente por carbono e alguns outros materiais inertes (vidros, metais, entre outros) caso não tenham sido previamente separados.

A gaseificação é um processo termoquímico que converte materiais orgânicos em gases, esse processo ocorre sem combustão, através do controle adequado da quantidade de oxigênio durante a reação. (AHMED & GUPTA, 2010)

A gaseificação normalmente ocorre em temperaturas superiores a 650 °C e em um ambiente com pouco oxigênio, permitindo a oxidação parcial e conseqüentemente a geração de gás de síntese. A composição do gás obtido, assim como o seu poder calorífico, irá depender do agente gaseificante.

Uma das maiores vantagens da gaseificação é a sua versatilidade, já que produz gás de síntese que pode ser armazenado e posteriormente queimado de forma controlada de acordo com a demanda energética.

2.3.3 - Combustível Derivado de Resíduo (CDR)

De acordo com (R Infiesta, 2019), o Combustível Derivado de Resíduo (CDR) é produzido através de resíduos sólidos, que podem ser provenientes de diferentes atividades e que devem passar por diversas etapas como: triagem, secagem, moagem, compactação.

Esse combustível poderá ser incinerado ou passar por um processo de pirólise com o objetivo de gerar gás de síntese (syngas), em ambos os processos, a quantidade de energia produzida está relacionada à qualidade do combustível gerado, que depende da composição dos resíduos utilizados.

A vantagem de utilizar CDR no lugar de RSU se deve a maior homogeneidade e menor teor de umidade do combustível, que devido a esses fatores costuma apresentar um maior poder calorífico. Em contrapartida, a utilização de CDR exige um pré-processamento dos resíduos, aumentando o custo inicial e de manutenção da instalação.

A qualidade do combustível gerado por esse processo é um fator importante no estudo de viabilidade de uma usina que utilize processos térmicos para gerar energia através de CDR. Já que caso o combustível gerado tenha um poder calorífico muito baixo, a operação poderá ser inviável, pois acabaria gerando um tempo de

payback muito grande, também é importante levar em consideração a controlabilidade do processo ao se utilizar este tipo de combustível.

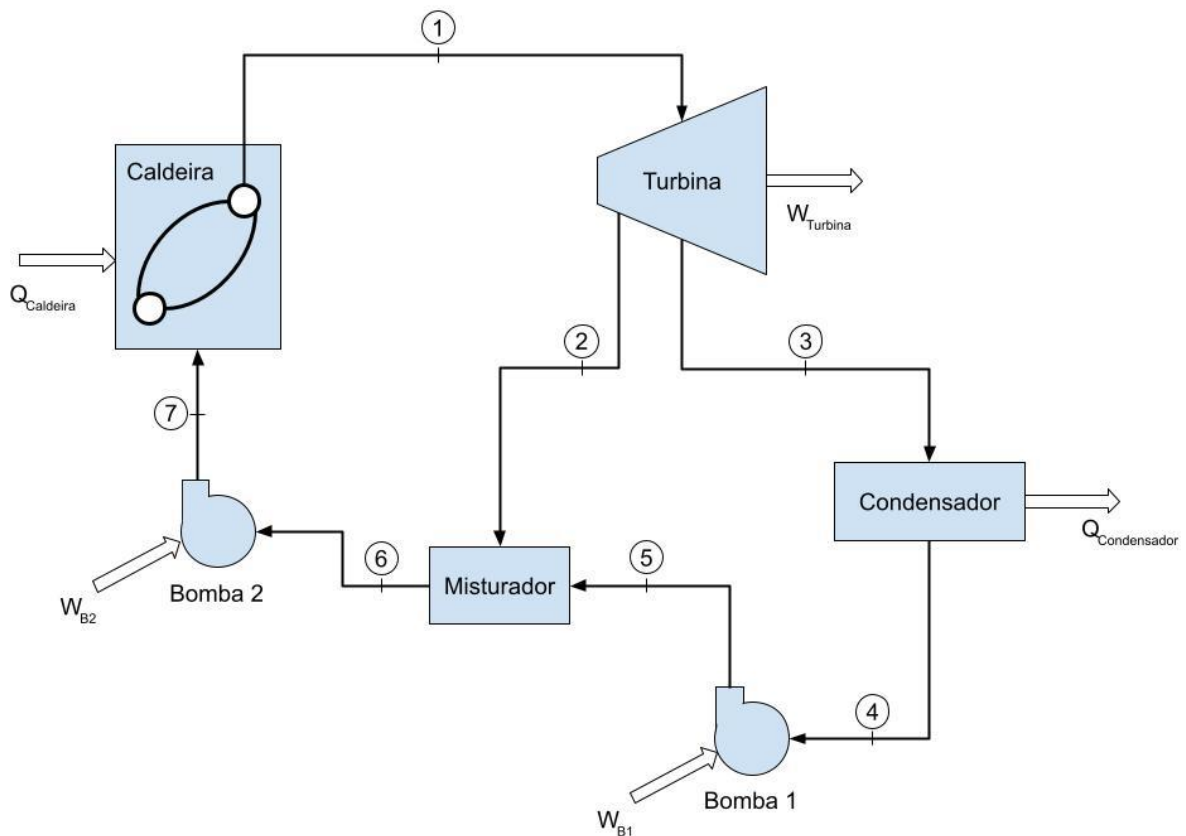
Para este estudo, iremos considerar a utilização de RSU como combustível a ser incinerado diretamente, entretanto, vale ressaltar que o CDR tem um grande potencial energético. Sendo assim, a análise de um ciclo similar utilizando CDR pode ser uma possibilidade de continuidade deste estudo.

3. METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentadas as premissas básicas que serão utilizadas para fazer o estudo de caso do aproveitamento energético de RSU na cidade de Uberlândia-MG.

Com base nos dados apresentados anteriormente, foi escolhida a tecnologia de incineração pois é a tecnologia mais difundida atualmente. Quanto ao ciclo termodinâmico escolhido, será utilizado um ciclo regenerativo com aquecedor de água de alimentação. Sendo assim, iremos fazer a análise do ciclo termodinâmico conforme esquema abaixo:

Figura 8. Ciclo Rankine regenerativo a ser analisado.



Fonte: Autoria Própria.

O sistema termodinâmico se inicia com uma caldeira gerando vapor a alta pressão e temperatura. Uma turbina extrai parte desse vapor, enquanto o restante segue para um condensador. A fração direcionada para o condensador, posteriormente, passa por uma bomba para alcançar o misturador. No misturador, o

vapor superaquecido extraído e o condensado comprimido combinam-se com o propósito de elevar a temperatura de entrada da água na caldeira. Em seguida, uma bomba de retorno conduz esse fluido de volta à caldeira, concluindo o ciclo. A implementação desse ciclo é estrategicamente escolhida para otimizar a eficiência na produção de energia.

3.1 - PREMISAS:

Para fazer a análise do sistema, foram adotadas as seguintes premissas:

- Não há perda de carga/calor nas tubulações;
- A caldeira possui uma eficiência de 85 % na transformação de RSU em calor;
- A turbina possui eficiência isentrópica de 85 % em ambos os estágios;
- As bombas possuem eficiência isentrópica de 80 %;
- As transferências de calor ocorrem à pressão constante;
- O processo está em regime permanente com uma vazão de combustível aproximadamente constante.

3.2 – ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS:

Primeiramente, é necessário calcular o estado termodinâmico em cada um dos pontos do nosso fluxograma, iniciando pelo ponto 1 (saída da caldeira) e considerando os processos um a um até atingir o ponto 7 (entrada da caldeira).

Considerando uma usina que possui uma única caldeira com superaquecedor, gerando vapor a uma pressão de 42 kgf/cm² e temperatura de 460 °C, podemos utilizar essas duas propriedades termodinâmicas para definir o estado termodinâmico no ponto 1.

Para determinar o estado termodinâmico no ponto 2, que corresponde à extração da turbina, consideramos um processo com eficiência isentrópica de 85% e uma pressão de saída de 2,5 kgf/cm². Nesse sentido, é necessário inicialmente calcular a entalpia isentrópica e, em seguida, aplicar a fórmula para o rendimento da turbina. O estado termodinâmico será, portanto, estabelecido com base na pressão e na entalpia, calculada pela fórmula:

$$\eta_{TG_{ext}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (Eq. 1)$$

Onde:

$\eta_{TG_{ext}}$ – eficiência isentrópica da extração da turbina;

h_1 – entalpia na entrada da turbina;

h_2 – entalpia na extração da turbina;

h_{2s} – entalpia isentrópica na extração da turbina

Prosseguindo para o ponto 3, referente à saída da turbina, será adotado um processo com eficiência isentrópica de 85% e uma pressão de saída de 0,7 kgf/cm². O método para determinar o estado termodinâmico no ponto 3 seguirá a mesma abordagem utilizada para o ponto 2. Ao utilizar o mesmo procedimento, temos:

$$\eta_{TG_{out}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_{3s}} \quad (Eq. 2)$$

Onde:

$\eta_{TG_{out}}$ – eficiência isentrópica da saída da turbina;

h_2 – entalpia na extração da turbina;

h_3 – entalpia na saída da turbina;

h_{3s} – entalpia isentrópica na saída da turbina

Para o condensador, considera-se que a troca de calor ocorre à pressão constante de 0,7 kgf/cm², e o fluido de saída é líquido saturado, possuindo título igual a zero. Com essas duas propriedades, é possível determinar o estado termodinâmico no ponto 4.

Em seguida, abordamos a bomba pós-condensador, cuja pressão de saída é igual a 2,5 kgf/cm². Considerando uma eficiência isentrópica da bomba de 80%, podemos determinar o estado termodinâmico no ponto 5 por meio da pressão e da entalpia. A entalpia será calculada conforme a fórmula do rendimento da bomba:

$$\eta_{B1} = \frac{h_{5s} - h_4}{h_5 - h_4} \quad (Eq. 3)$$

Onde:

η_{B1} – efi cênci ai sentrópi cada bomba 1;

h_4 – entalpi ana entrada da bomba 1;

h_5 – entalpi ana saída da bomba 1;

h_{5s} – entalpi ai sentrópi cana saída da bomba 1.

O ponto 6 representa a saída do misturador, onde ocorre a combinação do vapor superaquecido da extração da turbina com o condensado proveniente da bomba 1. Nesse estágio, ocorre uma troca de calor à pressão constante de 2,5 kgf/cm² e a saída possui um título igual a zero, facilitando a determinação direta do estado termodinâmico.

Por fim, o ponto 7 indica a saída da bomba, cuja pressão deve igualar-se à pressão de operação da caldeira, estabelecida em 42 kgf/cm². Nesse cenário, mais uma vez, consideramos uma bomba com eficiência isentrópica de 80%. Dessa forma, o estado termodinâmico será definido mediante a pressão e a entalpia, calculada por meio da seguinte equação:

$$\eta_{B2} = \frac{h_{7s} - h_6}{h_7 - h_6} \quad (Eq. 4)$$

Onde:

η_{B2} – efi cênci ai sentrópi cada bomba 2;

h_6 – entalpi ana entrada da bomba 2;

h_7 – entalpi ana saída da bomba 2;

h_{7s} – entalpi ai sentrópi cana saída da bomba 2.

3.3 – BALANÇO DE MASSA E ENERGIA:

Após calcular as propriedades termodinâmicas de todos os pontos do ciclo escolhido, o próximo passo consiste em realizar os balanços de massa e energia do sistema. Para isso, o primeiro valor a ser calculado será o calor gerado pela caldeira, determinado pela seguinte equação:

$$Q_{caldeira} = \dot{m}_{RSU} \cdot PCI_{RSU} \cdot \eta_{caldeira} \quad (Eq. 5)$$

Onde:

$Q_{caldeira}$ – calor produzido pela caldeira;

\dot{m}_{RSU} – vazão mássica de RSU;

PCI_{RSU} – poder calorífico inferior de RSU;

$\eta_{caldeira}$ – eficiência da caldeira.

Em seguida, é possível calcular a vazão de vapor que será produzida pela caldeira através da equação:

$$Q_{caldeira} = \dot{m}_1 \cdot h_1 - \dot{m}_7 \cdot h_7 \quad (Eq. 6)$$

Onde:

$Q_{caldeira}$ – calor produzido pela caldeira;

\dot{m}_1 – vazão mássica na saída da caldeira;

\dot{m}_7 – vazão mássica na entrada da caldeira;

h_1 – entalpia na saída da caldeira;

h_7 – entalpia na entrada da caldeira.

Além disso, é crucial calcular a máxima fração de extração da turbina, que permitirá calcular a vazão de vapor na extração relativa à vazão de entrada da turbina. Esta fração é representada da seguinte forma:

$$y = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \quad (Eq. 7)$$

Onde:

y – fração de extração da turbina

\dot{m}_1 – vazão mássica de vapor na entrada da turbina

\dot{m}_2 – vazão mássica de vapor na extração da turbina

A escolha dessa máxima fração de extração da turbina é feita de maneira a garantir que a saída do misturador esteja na condição de líquido saturado. Isso pode ser garantido através da seguinte equação:

$$y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_5} \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

y – fração de extração da turbina

h_2 – entalpia de extração da turbina

h_5 – entalpia de saída da bomba 1 (após o condensador);

h_6 – entalpia na saída do misturador.

Para a análise da turbina, deve-se aplicar a equação de energia considerando a extração e a saída da turbina conforme equação abaixo:

$$\dot{W}_{Turbina} = \dot{m}_1 \cdot h_1 - \dot{m}_2 \cdot h_2 - \dot{m}_3 \cdot h_3 \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde:

$\dot{W}_{Turbina}$ – energia produzida pela turbina

\dot{m}_1 – vazão mássica na entrada da turbina

\dot{m}_2 – vazão mássica na extração da turbina

\dot{m}_3 – vazão mássica na saída da turbina

h_1 – entalpia na entrada da turbina

h_2 – entalpia na extração da turbina

h_3 – entalpia na saída da turbina

Para as duas bombas, também será aplicada a equação de energia. Portanto, para a bomba 1, temos:

$$\dot{W}_{B1} = \dot{m}_4 \cdot h_4 - \dot{m}_5 \cdot h_5 \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde:

\dot{W}_{B1} – energia consumida pela bomba 1;

\dot{m}_4 – vazão mássica na entrada da bomba 1;

\dot{m}_5 – vazão mássica na saída da bomba 1;

h_4 – entalpia na entrada da bomba 1;

h_5 – entalpia na saída da bomba 1.

Para a bomba 2:

$$\dot{W}_{B2} = \dot{m}_6 \cdot h_6 - \dot{m}_7 \cdot h_7 \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde:

\dot{W}_{B2} – energia consumida pela bomba 2;

\dot{m}_6 – vazão mássica na entrada da bomba 2;

\dot{m}_7 – vazão mássica na saída da bomba 2;

h_6 – entalpia na entrada da bomba 2;

h_7 – entalpia na saída da bomba 2.

Quanto ao condensador, para calcular a quantidade de calor que será rejeitada, será utilizada a equação:

$$\dot{Q}_{\text{condensador}} = \dot{m}_4 \cdot h_4 - \dot{m}_3 \cdot h_3 \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

$Q_{condensador}$ – calor rejeitado pelo condensador;

\dot{m}_3 – vazão mássica na entrada do condensador;

\dot{m}_4 – vazão mássica na saída do condensador;

h_3 – entalpia na entrada do condensador;

h_4 – entalpia na saída do condensador.

Com isso, conclui-se a análise do balanço de massa e energia do sistema, que inclui o cálculo do calor gerado pela caldeira, a quantidade de calor rejeitada pelo condensador, a energia produzida pela turbina e a energia consumida pelas bombas. Através destas relações, também é possível calcular a vazão mássica em cada um dos pontos do ciclo.

3.4 - PODER CALORÍFICO DO RSU

Ao analisar um projeto voltado para o aproveitamento energético, é essencial abordar o poder calorífico do combustível utilizado, pois esse valor é fundamental para calcular a energia gerada durante a combustão. O poder calorífico de um combustível é uma medida termodinâmica que quantifica a energia liberada por unidade de massa durante o processo de combustão de uma substância.

Um desafio significativo ao determinar o poder calorífico de resíduos sólidos urbanos (RSU) surge da heterogeneidade do combustível, tanto em composição quanto em teor de umidade. Isso se deve à correlação direta entre a composição do RSU e os hábitos da população local, conforme discutido anteriormente.

Dessa forma, optamos por utilizar a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos na cidade de Uberlândia-MG como base para fazer uma estimativa a ser utilizada no decorrer deste trabalho. Com base nos dados previamente apresentados, é possível construir a Tabela 1:

Tabela 1. Composição Gravimétrica do RSU de Uberlândia-MG.

RSU	Percentual
Matéria Orgânica	52 %
Papel/Papelão	14 %
Plásticos	13 %
Vidros	3 %
Metais	2 %
Outros	16 %

Fonte: (DMAE, 2019)

Para avaliar o poder calorífico dos resíduos sólidos provenientes da cidade de Uberlândia-MG, adotaremos a referência do Poder Calorífico Inferior (PCI) para cada um dos seus componentes. Posteriormente, serão realizados os cálculos levando em consideração a proporção de cada elemento. Segundo dados da (FEAM, 2012), foi construída a Tabela 2 com o PCI em base úmida sem cinzas para os principais componentes do Resíduo Sólido Urbano (RSU).

Tabela 2. PCI dos diferentes componentes do RSU.

RSU	PCI (kcal/kg)
Matéria Orgânica	712
Papel e Papelão	2729
Plástico	8193

Fonte: (FEAM, 2012).

Ao utilizar os dados de composição gravimétrica e poder calorífico de cada componente, podemos calcular o poder calorífico do RSU através da equação:

$$PCI_{RSU} = P_{Org} \cdot PCI_{Org} + P_{Papel} \cdot PCI_{Papel} + P_{Plast} \cdot PCI_{Plast} \quad (Eq. 13)$$

Onde:

PCI_{RSU} – PCI do RSU;

P_{Org} – percentual de Matéria Orgânica no RSU;

PCI_{Org} – PCI da Matéria Orgânica em cada componente do RSU;

P_{Papel} – percentual de Papel no RSU;

PCI_{Papel} – PCI do Papel que compõe o RSU;

P_{Plast} – percentual de Plásti cono RSU;

PCI_{Plast} – PCI do Plásti coque compõe o RSU;

Ao utilizar a equação, obtém-se um valor aproximado de 7,60 MJ/kg para o Poder Calorífico Inferior (PCI) do Resíduo Sólido Urbano (RSU) proveniente de Uberlândia-MG. Para fins de comparação, um estudo conduzido por (DRUDI, DRUDI, MARTINS, & ANTONIO, 2019) envolvendo medições do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos de Santo André-SP alcançou um valor médio de 7,03 MJ/kg. Dada a variação na composição gravimétrica e umidade dos resíduos entre as duas cidades, podemos concluir que o valor teórico obtido está próximo da realidade.

4. RESULTADOS

Com base nas equações descritas no capítulo anterior, torna-se possível calcular as principais propriedades termodinâmicas em cada ponto do fluxograma. Para essa finalidade, foi utilizado um script em Python utilizando a biblioteca CoolProp, cujo código está disponibilizado no Apêndice A. As propriedades calculadas estão detalhadas na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades Termodinâmicas de cada ponto do ciclo analisado.

Ponto	Pressão (kgf/cm ²)	Temperatura (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg/K)
1	42,00	460,00	3352,47	6,95
2	2,50	154,85	2775,76	7,20
3	0,70	89,42	2589,49	7,29
4	0,70	89,42	374,52	1,19
5	2,50	89,44	374,76	1,19
6	2,50	126,77	532,61	1,60
7	42,00	127,37	537,79	1,60

Fonte: Autoria Própria.

Posteriormente, para a determinação do calor produzido na caldeira e, conseqüentemente, a vazão de vapor, adotou-se uma taxa de combustível constante de 12,5 toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) por hora, equivalente a 300 toneladas diárias, representando aproximadamente 56% do total de resíduos gerados em Uberlândia-MG. Esse valor é superior às 250 toneladas diárias, considerado o valor mínimo recomendado para uma planta de incineração de RSU conforme (FEAM, 2012).

Adicionalmente, com base nos cálculos feitos no capítulo anterior, adotou-se um valor de Poder Calorífico Inferior de 7,60 MJ/kg para o RSU. Utilizando o mesmo código (Apêndice A), as vazões em cada ponto foram calculadas, e os resultados estão apresentados na Tabela 4:

Tabela 4. Vazão mássica de cada ponto do ciclo analisado.

Ponto	Vazão (kg/s)
1	7,97
2	0,52
3	7,45
4	7,45
5	7,45
6	7,97
7	7,97

Fonte: Autoria Própria.

Com base nestes dados, podemos resolver as equações do balanço de energia, obtendo os seguintes resultados:

$$Q_{cal\ dei\ ra} = 22430,56\ kW$$

$$Q_{condensador} = -16490,86\ kW$$

$$W_{Turbi\ na} = 5982,71\ kW$$

$$W_{B1} = -1,75\ kW$$

$$W_{B2} = -16,51\ kW$$

Com esses dados, podemos calcular a eficiência energética deste ciclo:

$$\eta = \frac{W_{liq}}{Q} = \frac{W_{Turbi\ na} + W_{B1} + W_{B2}}{Q_{cal\ dei\ ra}}$$

Neste contexto, é possível destacar que o ciclo analisado apresenta um rendimento de 26,48%. Vale ressaltar também que esse ciclo possui a capacidade de gerar aproximadamente 6 MWh de energia, o que representa um potencial comercial significativo.

Adicionalmente, estima-se que a planta em questão teria a capacidade de produzir 0,48 MWh por tonelada de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Conforme indicado pela literatura (FEAM, 2012), os valores comuns para a geração de energia elétrica em plantas de incineração de RSU geralmente variam entre 0,4 MWh e 0,6

MWh por tonelada de RSU. Dessa forma, o ciclo termodinâmico descrito está de acordo com os parâmetros já estabelecidos na prática.

Esses resultados reforçam a viabilidade da incineração de RSU e mostram novas perspectivas para o uso energético dos resíduos sólidos urbanos na cidade de Uberlândia-MG, contribuindo para a matriz energética local de forma econômica e sustentável.

5. CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho, foi proposta a implementação de um ciclo Rankine regenerativo para gerar energia elétrica por meio da incineração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) na cidade de Uberlândia-MG. A análise dos dados e a solução apresentada destacam um potencial significativo para a produção de energia a partir dos resíduos locais.

Ao utilizar apenas 56% dos resíduos gerados diariamente na cidade, seria possível gerar cerca de 6 MWh de energia. Essa energia poderia ser direcionada para diversas finalidades, como venda direta para a companhia elétrica, comercialização para fábricas locais ou utilização na alimentação de prédios governamentais.

Diante do cenário internacional atual, caracterizado pela crescente demanda por investimentos em tecnologias de menor impacto ambiental, este estudo ganha relevância.

Além disso, ainda existe a oportunidade de expandir essa abordagem, explorando outras tecnologias de conversão de RSU em energia, com destaque para a pirólise, assim como a utilização de Combustível derivado de resíduo (CDR). Essa expansão permitiria uma análise mais abrangente das opções disponíveis, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência energética na gestão de resíduos urbanos. Concluindo, os resultados obtidos apontam para um cenário promissor no aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, coerente com as tendências globais de sustentabilidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. (1985). *NBR 8849 - Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas .
- ABNT. (1992). *NBR 8419 - Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABRELPE. (2018). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017*. Acesso em 01 de Ago de 2019, disponível em http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf
- AHMED, I., & GUPTA, A. (2010). Pyrolysis and gasification of food waste: Syngas characteristics and char gasification kinetics. *Applied Energy*, Volume 87.
- BRASIL. (2 de Ago de 2010). Lei nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010. *Política Nacional de Resíduos Sólidos*.
- CARVALHO, R. d., TAVARES, A., SANTOS, G., & BAJAY, S. (2019). *Oportunidades Enterradas: Geração elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos urbanos*. Vitória: EDUFES.
- CONER. (2007). *Matriz energética de Minas Gerais 2007 –2030*. Belo Horizonte: UFRJ/UNIF: Conselho Estadual de Energia.
- DMAE. (2019). *Gráficos da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos*. Departamento Municipal de Água e Esgoto, Uberlândia.
- DRUDI, K., DRUDI, R., MARTINS, G., & ANTONIO, G. C. (2019). *Statistical model for heating value of municipal solid waste in brazil based on gravimetric composition*. *Waste Manag.* 87.
- ENGEBIO. (2010). *Identificação do potencial de geração de metano e energético e definição do melhor tipo de aproveitamento para os aterros sanitários de Betim, Contagem e Uberlândia*. Porto Alegre: ENGEBIO ENGENHARIA S/S LTDA.
- EPE. (2018). *Balanço Energético Nacional (BEN) 2018: [Ano base 2017]*. Acesso em 30 de Jul de 2019, disponível em <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf

EPE. (2018). *Consumo anual de energia elétrica por classe (nacional) [1995-2018]*. Acesso em 30 de Jul de 2019, disponível em <http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-Anual-de-Energia-Eletrica-por-classe-nacional>

FEAM. (2012). *Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: Guia de Orientações para Governos Municipais de Minas Gerais*. Acesso em 01 de Ago de 2019, disponível em http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/2013/aproveitamento%20energetico%20de%20rsu_guia%20de%20orientaes_versao_publicacao_on_line.pdf

HOORNWEG, D., & BHADA-TATA, P. (2012). *What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management*. Washington.

IBGE. (2019). *Coleta de Resíduos*. Acesso em 03 de Ago de 2019, disponível em Prefeitura de Uberlândia: <https://www.uberlandia.mg.gov.br/prefeitura/orgaos-municipais/dmae/servicos-dmae/coleta-de-residuos/>

IBGE. (2019). *Coordenação de População e Indicadores Sociais*. Acesso em 06 de Nov. de 2019, disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/uberlandia/panorama>

ICLEI. (2009). *Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários*. São Paulo: ICLEI –Governos Locais pela Sustentabilidade, secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil.

MENEZES, R. A., Gerlach, J., & Menezes, M. (Abril de 2000). Estágio Atual Da Incineração No Brasil. *ABLP Associação Brasileira de Limpeza Pública*. Fonte: ABLP Associação Brasileira de Limpeza Pública.

MORGADO, T. C., & FERREIRA, O. M. (2006). *Incineração de resíduos sólidos urbanos*. Goiânia: Departamento de Engenharia, Universidade Católica de Goiás.

NASCIMENTO, J. C. (2007). *Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos*. São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

R Infiesta, L. &. (Fev de 2019). Design of an industrial solid waste processing line to produce refuse-derived fuel. *Journal of Environmental Management*, p. 236.

SHAFIZADEH, F. (1982). *Introduction to pyrolysis of biomass*. Montana: Department of Chemistry, University of Montana.

WALDMAN, M. (2010). *Lixo: cenários e desafios – abordagens básicas para entender os resíduos sólidos*. São Paulo.

APÊNDICE A: MEMORIAL DE CÁLCULO

```
# Import System Libs
from CoolProp.CoolProp import PropsSI
from CoolProp.State import State
from tabulate import tabulate
import pandas as pd
```

```
# ----- Funções para Conversão -----
```

```
# Tonelada por hora para Kg/s
```

```
def tvh_to_kgs(tvh):
    kgs = tvh/(3.6)
    return(kgs)
```

```
# Kg/s para Tonelada por hora
```

```
def kgs_to_tvh(kgs):
    tvh = kgs*(3.6)
    return(tvh)
```

```
# Celsius para Kelvin
```

```
def Celsius_to_Kelvin(C):
    K = C+273.15
    return(K)
```

```
# Kelvin para Celsius
```

```
def Kelvin_to_Celsius(K):
    C = K-273.15
    return(C)
```

```
# kgf/cm2 para Pascal
```

```
def kgfcm2_to_Pa(kgf):
    Pa = kgf*98066.5
    return(Pa)
```

```
# -----
```

```

# ----- Função para Determinar Estado -----
# Essa função irá retornar o estado termodinâmico dada as propriedades: Pressão,
# Temperatura e Título
# Tonelada por hora para Kg/s
def define_state(P, T, Q):
# States: 0 = Líquido Comprido, 1 = Líquido Saturado, 2 = Mistura, 3 = Vapor Saturado, 4 =
# Vapor Superaquecido
    if Q == 0.0:
        state = 1
        string = "Líquido Saturado"
    elif Q == 1.0:
        state = 3
        string = "Vapor Saturado"
    elif Q > 0.0 and Q < 1.0:
        state = 2
        string = f'Título = {Q:.2f}'
    else:
        Tsat = PropsSI('T', 'P', P, 'Q', 0.0, 'IF97::Water') # Saturation Temperature
        if T > Tsat:
            state = 4
            string = "Vapor Superaquecido"
        else:
            state = 0
            string = "Líquido Comprido"

    return(state, string)

# -----

# - Calculando Propriedades Termodinâmicas -
# Ponto 1: (Saída da Caldeira - Vapor Superaquecido)
Pres_p1 = 42.0 # kgf/cm2
Temp_p1 = 460.0 # Celsius
h_p1 = PropsSI('H', 'T', Celsius_to_Kelvin(Temp_p1), 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p1),
'IF97::Water') # J/kg
s_p1 = PropsSI('S', 'T', Celsius_to_Kelvin(Temp_p1), 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p1),
'IF97::Water') # J/kg/K

```

```
Qual_p1 = PropsSI('Q', 'T', Celsius_to_Kelvin(Temp_p1), 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p1),  
'IF97::Water') # Quality 0.0 ~ 1.0  
state_p1, string_p1 = define_state(P = kgfcm2_to_Pa(Pres_p1), T =  
Celsius_to_Kelvin(Temp_p1), Q = Qual_p1)
```

Ponto 2: (Extração da Turbina (TG) - Processo Isentrópico entre P1 e P2)

```
eff_TG_ext = 0.85  
Pres_p2 = 2.5 # kgf/cm2  
hs_p2 = PropsSI('H', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p2), 'S', s_p1, 'IF97::Water') # J/kg  
h_p2 = h_p1*(1 - eff_TG_ext) + hs_p2*eff_TG_ext  
Temp_p2 = Kelvin_to_Celsius(PropsSI('T', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p2), 'H', h_p2,  
'IF97::Water')) # Celsius  
s_p2 = PropsSI('S', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p2), 'H', h_p2, 'IF97::Water') # J/kg/K  
Qual_p2 = PropsSI('Q', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p2), 'H', h_p2, 'IF97::Water') # Quality 0.0 ~  
1.0  
state_p2, string_p2 = define_state(P = kgfcm2_to_Pa(Pres_p2), T =  
Celsius_to_Kelvin(Temp_p2), Q = Qual_p2)
```

Ponto 3: (Saída da Turbina (TG) - Processo Isentrópico entre P2 e P3)

```
eff_TG_out = 0.85  
Pres_p3 = 0.7 # kgf/cm2  
hs_p3 = PropsSI('H', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p3), 'S', s_p2, 'IF97::Water') # J/kg  
h_p3 = h_p2*(1 - eff_TG_out) + hs_p3*eff_TG_out  
Temp_p3 = Kelvin_to_Celsius(PropsSI('T', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p3), 'H', h_p3,  
'IF97::Water')) # Celsius  
s_p3 = PropsSI('S', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p3), 'H', h_p3, 'IF97::Water') # J/kg/K  
Qual_p3 = PropsSI('Q', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p3), 'H', h_p3, 'IF97::Water') # Quality 0.0 ~  
1.0  
state_p3, string_p3 = define_state(P = kgfcm2_to_Pa(Pres_p3), T =  
Celsius_to_Kelvin(Temp_p3), Q = Qual_p3)
```

Ponto 4: (Saída do Condensador - Líquido Saturado)

```
Pres_p4 = 0.7 # kgf/cm2  
Qual_p4 = 0.0 # Quality 0.0 ~ 1.0  
Temp_p4 = Kelvin_to_Celsius(PropsSI('T', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p4), 'Q', Qual_p4,  
'IF97::Water')) # Celsius
```

```

h_p4 = PropsSI('H', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p4), 'Q', Qual_p4, 'IF97::Water') # J/kg
s_p4 = PropsSI('S', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p4), 'Q', Qual_p4, 'IF97::Water') # J/kg/K
state_p4, string_p4 = define_state(P = kgfcm2_to_Pa(Pres_p4), T =
Celsius_to_Kelvin(Temp_p4), Q = Qual_p4)

```

Ponto 5: (Saída da Bomba (B1) após o Condensador - Processo Isentrópico entre P4 e P5)

```

eff_B1 = 0.80
Pres_p5 = 2.5 # kgf/cm²
hs_p5 = PropsSI('H', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p5), 'S', s_p4, 'IF97::Water') # J/kg
h_p5 = (hs_p5 - h_p4*(1 - eff_B1))/(eff_B1)
Temp_p5 = Kelvin_to_Celsius(PropsSI('T', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p5), 'H', h_p5,
'IF97::Water')) # Celsius
s_p5 = PropsSI('S', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p5), 'H', h_p5, 'IF97::Water') # J/kg/K
Qual_p5 = PropsSI('Q', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p5), 'H', h_p5, 'IF97::Water') # Quality 0.0 ~
1.0
state_p5, string_p5 = define_state(P = kgfcm2_to_Pa(Pres_p5), T =
Celsius_to_Kelvin(Temp_p5), Q = Qual_p5)

```

Ponto 6: (Saída do Misturador - Líquido Saturado)

```

Pres_p6 = 2.5 # kgf/cm²
Qual_p6 = 0.0 # Quality 0.0 ~ 1.0
Temp_p6 = Kelvin_to_Celsius(PropsSI('T', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p6), 'Q', Qual_p6,
'IF97::Water')) # Celsius
h_p6 = PropsSI('H', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p6), 'Q', Qual_p6, 'IF97::Water') # J/kg
s_p6 = PropsSI('S', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p6), 'Q', Qual_p6, 'IF97::Water') # J/kg/K
state_p6, string_p6 = define_state(P = kgfcm2_to_Pa(Pres_p6), T =
Celsius_to_Kelvin(Temp_p6), Q = Qual_p6)

```

Ponto 7: (Saída da Bomba (B2) após o Misturador - Processo Isentrópico entre P6 e P7)

```

eff_B2 = 0.80
Pres_p7 = 42.0 # kgf/cm²
hs_p7 = PropsSI('H', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p7), 'S', s_p6, 'IF97::Water') # J/kg
h_p7 = (hs_p7 - h_p6*(1 - eff_B2))/(eff_B2)
Temp_p7 = Kelvin_to_Celsius(PropsSI('T', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p7), 'H', h_p7,
'IF97::Water')) # Celsius

```

```

s_p7 = PropsSI('S', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p7), 'H', h_p7, 'IF97::Water') # J/kg/K
Qual_p7 = PropsSI('Q', 'P', kgfcm2_to_Pa(Pres_p7), 'H', h_p7, 'IF97::Water') # Quality 0.0 ~
1.0
state_p7, string_p7 = define_state(P =kgfcm2_to_Pa(Pres_p7), T =
Celsius_to_Kelvin(Temp_p7), Q = Qual_p7)

```

Equacionamento da Caldeira

PCI_RSU = 7600000.0 # J/kg

mp_RSU = 12.5 # ton/h

eff_caldeira = 0.85 # Caldeira com 80% de eficiência

O Calor produzido pela caldeira é dado por:

*# $Q = m * PCI$*

Qp_cald = tvh_to_kgs(mp_RSU)*PCI_RSU*eff_caldeira

Calcular fração de extração

A fração de extração deve obedecer os estados termodinâmicos estabelecidos anteriormente

Para isso, deve-se considerar essa equação para o misturador

$y = (h_{p6} - h_{p5}) / (h_{p2} - h_{p5})$

A vazão de vapor produzida pela caldeira é dada por:

$mp_{p1} = Qp_cald / (h_{p1} - h_{p7})$

$mp_{p2} = y * mp_{p1}$

$mp_{p3} = (1 - y) * mp_{p1}$

$mp_{p4} = (1 - y) * mp_{p1}$

$mp_{p5} = (1 - y) * mp_{p1}$

$mp_{p6} = mp_{p1}$

$mp_{p7} = mp_{p1}$

Calor no Condensador

$Qp_cond = mp_{p4} * h_{p4} - mp_{p3} * h_{p3}$

Equações de Energia

Energia produzida pela turbina

```
Wp_TG = mp_p1*h_p1 - mp_p2*h_p2 - mp_p3*h_p3
```

```
# Energia consumida pela Bomba 1
```

```
Wp_B1 = mp_p4*h_p4 - mp_p5*h_p5
```

```
# Energia consumida pela Bomba 2
```

```
Wp_B2 = mp_p6*h_p6 - mp_p7*h_p7
```

```
efficiency = 100*(Wp_TG + Wp_B1 + Wp_B2)/Qp_cald
```

```
termo_table = [['Ponto', 'Pressão (kgf/cm²)', 'Temperatura (°C)', 'Entalpia (kJ/kg)', 'Entropia  
(kJ/kg/K)', 'Vazão (kg/s)', 'Estado'],
```

```
    [1, Pres_p1, Temp_p1, h_p1/1000.0, s_p1/1000.0, mp_p1, string_p1],  
    [2, Pres_p2, Temp_p2, h_p2/1000.0, s_p2/1000.0, mp_p2, string_p2],  
    [3, Pres_p3, Temp_p3, h_p3/1000.0, s_p3/1000.0, mp_p3, string_p3],  
    [4, Pres_p4, Temp_p4, h_p4/1000.0, s_p4/1000.0, mp_p4, string_p4],  
    [5, Pres_p5, Temp_p5, h_p5/1000.0, s_p5/1000.0, mp_p5, string_p5],  
    [6, Pres_p6, Temp_p6, h_p6/1000.0, s_p6/1000.0, mp_p6, string_p6],  
    [7, Pres_p7, Temp_p7, h_p7/1000.0, s_p7/1000.0, mp_p7, string_p7]]
```

```
print(tabulate(termo_table, headers='firstrow', tablefmt='fancy_grid', floatfmt=".2f"))
```

```
efficiency_table = [['Ponto', 'Calor (kW)', 'Trabalho (kW)],
```

```
    ["Caldeira", Qp_cald/1000.0, 0.0],  
    ["Condensador", Qp_cond/1000.0, 0.0],  
    ["Turbina", 0.0, Wp_TG/1000.0],  
    ["Bomba 1", 0.0, Wp_B1/1000.0],  
    ["Bomba 2", 0.0, Wp_B2/1000.0]]
```

```
print(tabulate(efficiency_table, headers='firstrow', tablefmt='fancy_grid', floatfmt=".2f"))
```