

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

DANIELA DA SILVA WILHELM

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM
CICLO COMBINADO HÍBRIDO

São Leopoldo
2022

DANIELA DA SILVA WILHELM

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM
CICLO COMBINADO HÍBRIDO**

Artigo apresentado como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Energia, pelo Curso de
Engenharia de Energia da Universidade
do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientadora: Profa. Dra. Daiane Calheiro Evaldt

São Leopoldo

2022

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM CICLO COMBINADO HÍBRIDO

Daniela da Silva Wilhelm*

Nome da orientadora: Daiane Calheiro Evaldt**

Resumo: O grande aumento da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) tem sido um grande problema devido às complicações ambientais e sociais que causam. Ao governo, entidades e sociedade cabem o desafio de gerenciar de forma ambientalmente e economicamente segura o destino destes resíduos. O aproveitamento energético para geração de energia deve ser considerado, visto o grande potencial que o RSU possui. Além da produção de energia elétrica, outros benefícios que o gerenciamento do aproveitamento energético proporciona são: ambientais, econômicos e sociais. O principal uso dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica e calor para processos industriais é a partir da combustão, que utiliza as mesmas tecnologias de termelétricas tradicionais já existentes, principalmente em ciclos combinados que oferecem uma melhor eficiência em comparação aos ciclos operando separadamente. Deste modo este trabalho visa analisar, do ponto de vista termodinâmico através de análise energética realizada no simulador EES (Engineering Equation Solver) e da eficiência ecológica, o aproveitamento de resíduos sólidos urbanos não recicláveis, em especial os plásticos, como combustível no ciclo a vapor para geração termelétrica em um ciclo combinado híbrido com reaquecimento. A eficiência encontrada do ciclo combinado híbrido com reaquecimento foi de 38%, gerando uma potência elétrica líquida de 82,8 MW e uma eficiência ecológica de 91%.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos. Ciclos combinados. Aproveitamento energético.

1 INTRODUÇÃO

O aumento expressivo da população urbana juntamente com o consumo elevado de produtos descartáveis tem gerado uma grande quantia de resíduos sólidos urbanos (RSU), tornando-se um desafio aos governos que devem encontrar soluções ambientais e econômicas de contornar este problema.

Atualmente, são gerados cerca de 2,01 bilhões de toneladas de RSU no mundo, segundo Kaza et al (2018) no relatório "What a Waste 2.0", e espera-se que até 2050 a geração seja de 3,4 bilhões de toneladas.

* Graduanda em Engenharia de Energia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS. E-mail: danielas.wilhelm@gmail.com.

** Professora orientadora Dra. Daiane Calheiro Evaldt. Professora dos cursos de Engenharia Ambiental, Engenharia Agrônoma, Engenharia de Energia, Gestão Ambiental e Biologia. Pesquisadora do Grupo NucMat. E-mail: DCALHEIRO@unisinis.br.

No Brasil foram gerados, em 2020, de acordo com a Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2021), cerca de 82,5 milhões de toneladas de RSU, sendo que muitos destes resíduos ainda se destinam a áreas de disposição inadequada, trazendo um prejuízo de mais de R\$ 3,6 bilhões ao governo relacionados à problemas ambientais e de saúde causados por esta ação.

Além do processo de reciclagem, que já vem sendo aplicado, o aproveitamento energético de RSU deve ser levado em consideração, essa finalidade para os resíduos vem sendo largamente utilizada em países da Europa e América do Norte para fins de: aquecimento, geração de energia elétrica e combustível veicular. Dentre os benefícios do aproveitamento energético, pode-se citar: contribuição à matriz energética como fonte alternativa de energia, redução do volume e da massa de resíduos sólidos urbanos possibilitando o aumento da vida útil dos aterros existentes.

Em 2011, segundo Kaza et al (2018), o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos no mundo ofertou cerca de 90 TWh de energia elétrica. As principais formas de aproveitamento de RSU para geração de energia elétrica são a partir do biogás, principalmente biometano, e da combustão.

Desse modo, o presente trabalho visa analisar, através de análise energética e ecológica a viabilidade do aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos não recicláveis a partir da combustão destes, a fim de solucionar parte dos problemas relacionados às questões socioambientais provocadas pela geração dos resíduos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica da biomassa a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) e suas características, além disso, são apresentados os ciclos de potência a gás (Brayton) e a vapor (Rankine), que compõem o ciclo combinado.

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

A Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dispõe sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, define, em seu capítulo II, artigo 3º e inciso XVI:

Resíduos sólidos: 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 sólido ou semissólido, 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 inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010, Art. 3º).

Ainda, segundo a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, dentre as classificações dos resíduos sólidos urbanos tem-se a classificação quanto a sua origem, desse modo pode-se descrever que os resíduos sólidos urbanos são aqueles que provêm de atividades domésticas residenciais e comerciais, da varrição e limpeza de vias públicas, além de outros serviços de limpeza, como podas de árvores, em regiões urbanas (BRASIL, 2010).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente e o Ministério da Educação (2005), no Manual de Educação para o Consumo Sustentável, é possível separar os resíduos também quanto à sua finalidade, ou seja, os resíduos recicláveis e não recicláveis. Os resíduos sólidos recicláveis são todos aqueles que após passar por processo físico ou químico podem ser reutilizados para outras finalidades. Os resíduos sólidos urbanos não recicláveis, materiais foco deste trabalho, são aqueles que não possuem potencial de aproveitamento para reciclagem ou que não possuem viabilidade técnica ou financeira para reciclagem, assim, pode-se citar como resíduos sólidos urbanos não recicláveis:

- Papeis não recicláveis: adesivos, etiquetas, fita crepe, papel carbono, fotografias, papel toalha, papel higiênico, papeis e guardanapos engordurados, papeis metalizados, parafinados ou plastificados;
- Metais não recicláveis: esponjas de aço, latas de combustíveis e pilhas;

- Plásticos não recicláveis: tomadas, isopor, adesivos, espumas, acrílicos, embalagens plásticas metalizadas (como de salgadinhos e bolachas); e
- Vidros não recicláveis: espelhos, cristais, ampolas de medicamento, cerâmicas e louças, lâmpadas, vidros temperados planos.

Conforme, a Lei nº 12.305, no que diz respeito as diretrizes aplicadas aos resíduos sólidos urbanos, no artigo 9º, parágrafo 1º:

Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental (BRASIL, 2010, Art. 9º).

De acordo com o que define a Portaria Interministerial Nº 274, de 30 de abril de 2019, que disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, em seu artigo 3º:

A recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos constitui uma das formas de destinação final ambientalmente adequada passível de ser adotada, observadas as alternativas prioritárias de não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, conforme estabelecido no caput e § 1º do art. 9º da Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2019, Art. 3º).

2.1.1 Mercado e produção de RSU no Brasil

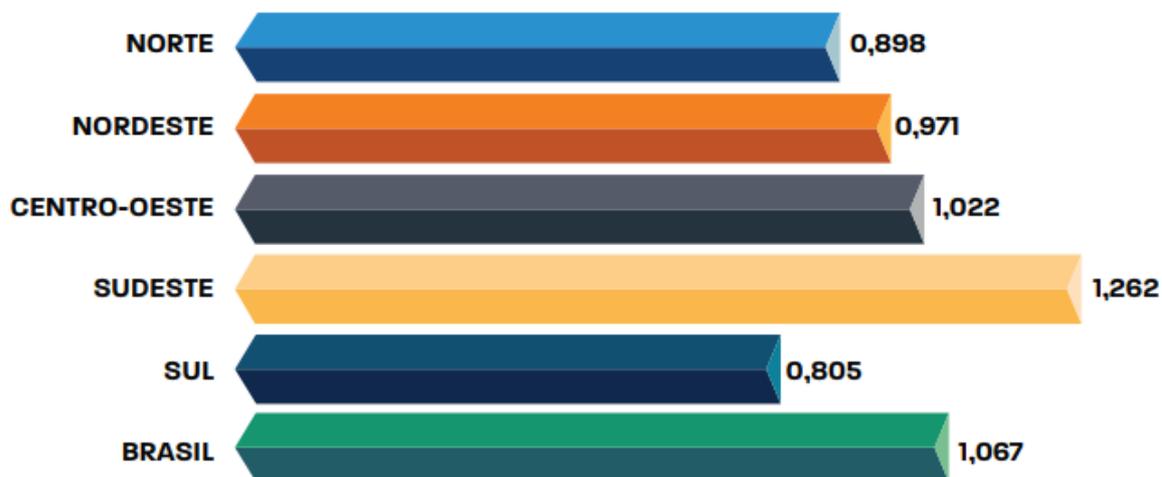
O consumo em grande escala de produtos industrializados e descartáveis, associado ao aumento desordenado das cidades brasileira junto ao cenário de pandemia COVID-19, tem provocado um acréscimo considerável na produção de resíduos sólidos urbanos.

Segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2020), desenvolvido pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), a geração de RSU entre 2017 e 2018 foi de 79 milhões de toneladas, podendo ser observado um aumento de 1% em relação ao ano anterior, sendo que a produção de resíduos per capita foi de 1,039 kg/hab/dia representando um aumento de 0,39% em relação ao ano anterior.

No ano de 2020, a produção de RSU foi altamente impactada pela pandemia do COVID-19 tendo alcançado uma geração de aproximadamente 82,5 milhões de toneladas no total, cerca de 225.965 toneladas diárias. Desse modo, cada habitante

gerou próximo de 1,07 kg de resíduo por dia, conforme ilustra o gráfico 1 (ABRELPE, 2021).

Gráfico 1 - Geração de RSU (kg/hab/dia) por região



Fonte: ABRELPE (2021, p. 18).

Ainda, segundo a ABRELPE, no ano de 2020 a cobertura da coleta desses resíduos sólidos urbanos chegou a 92%, aproximadamente 76,1 milhões de toneladas coletadas.

O índice de reciclagem no Brasil tem um patamar consideravelmente baixo, alguns motivos para tal situação são: população não adere a coleta seletiva (por desconhecimento ou falta de infraestrutura para tal), mercados de reciclagem e comercialização mal estruturados, tributação incidente sobre as etapas de reciclagem fazendo que haja uma concorrência desleal com alternativas de disposição em aterros (MMA, 2022).

O gráfico 2 traz uma amostra realizada pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) para o Plano Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos de quantidade de resíduos reciclados pelos municípios da amostra, sendo que esse total reciclado corresponde a apenas 2,2% em relação a massa total gerada (MMA, 2022).

Gráfico 2 – Massa de resíduos sólidos secos reciclados da amostra



Fonte: MMA (2022, p. 27).

Quanto à destinação final, cerca de 60% do RSU coletado seguiu para disposição em aterros sanitários enquanto uma parcela de 40% continua a ser disposta em áreas inadequadas, por exemplo, em aterros controlados, conforme ilustra tabela 1 (ABRELPE, 2021).

Tabela 1 – Disposição final de RSU no Brasil e regiões

Região	Disposição adequada (aterro sanitário)		Disposição inadequada (aterro controlado)	
	t/ano	%	t/ano	%
Norte	1.773.927	35,6	3.209.013	64,4
Nordeste	6.016.948	36,3	10.558.666	64,7
Centro-Oeste	2.456.849	42,5	3.323.972	57,5
Sudeste	29.542.830	73,4	10.706.257	26,6
Sul	6.011.894	70,8	2.479.482	29,2
Brasil	45.802.448	60,2	30.277.390	39,8

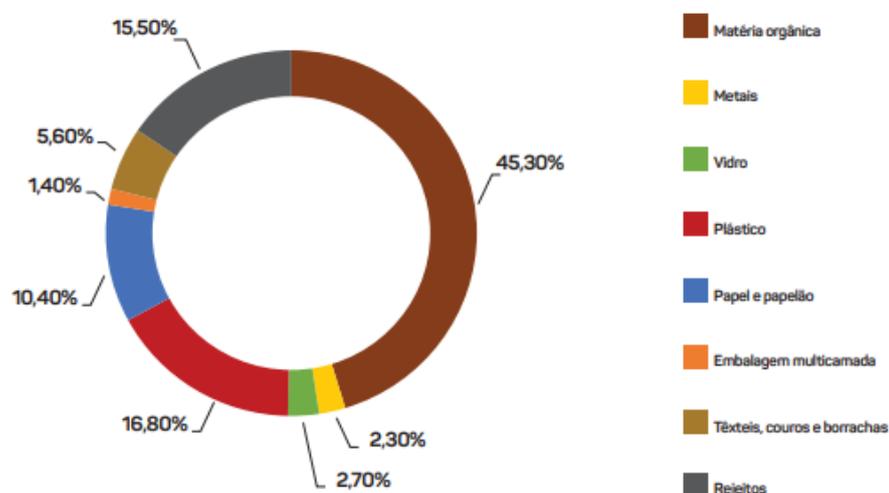
Fonte: Adaptado ABRELPE (2021, p. 22).

2.1.2 Caracterização dos resíduos sólidos urbanos

A devida caracterização e análise dos componentes dos resíduos sólidos urbanos são fundamentais para a sua adequada gestão, de acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos de 2022, a composição gravimétrica do montante de resíduos sólidos urbanos, que pode ser observada no gráfico 3, é constituída em sua

maior parte por material orgânico, seguido de matéria seca, sendo desta 16,80% material plástico, demais resíduos (22,40%) e rejeitos (15,50%) (MMA, 2022).

Gráfico 3 - Estimativa de composição do RSU



Fonte: MMA (2022, p. 19).

A composição físico-química é uma informação de suma importância para monitorar e avaliar a viabilidade da recuperação energética de resíduos sólidos urbanos. É uma informação difícil de ser encontrada devido à falta de padronização de procedimentos de amostragens, além das características variarem de acordo com a região (LEME, 2010). A tabela 2, traz os tipos juntamente com seus valores estimados da composição elementar para cada um dos resíduos sólidos urbanos.

Tabela 2 – Composição elementar do RSU (%)

Material	Composição elementar (% em massa)					
	C	H	O	N	S	Cinzas
Restos de alimentos	48	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Papel	43,4	6,0	44	0,3	0,2	6,0
Papelão	44	5,9	44,6	0,3	0,2	5,0
Plásticos (misturados)	60	7,2	22,8	0,0	0,0	10,0
Isopor	87,1	8,4	4,0	0,2	0,0	0,3
Borracha	70	7,0	0,0	1,7	1,3	20,0
Tecidos	55	7,7	31,2	4,6	0,2	2,5
Vidro	0,5	0,1	0,4	0,1	0,0	98,9
Metais	4,5	0,6	4,3	0,1	0,0	90,5
Rejeitos	3	0,0	0,0	0,0	0,0	97,0

Fonte: Adaptado de LEME (2010, p. 44)

O poder calorífico de um combustível é um fator determinante para viabilizar seu uso em sistemas de geração de energia. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2014), os resíduos sólidos urbanos orgânicos tendem a ter um poder calorífico mais baixo devido à alta umidade presente neles. Ainda se supõe que a incineração dos RSU que tenham poder calorífico inferior (PCI) menor do que 7.008,2 kJ/kg sejam tecnicamente difíceis de se realizar além de necessitar de combustível auxiliar para funcionamento da planta.

A tabela 3 apresenta o valor estimado do PCI em base seca, ou seja, valor desconsiderando o teor de umidade presente no material, em kJ/kg, de materiais normalmente encontrados em resíduos sólidos urbanos.

Tabela 3 – PCI em base seca, de materiais encontrados em RSU (kJ/kg)

Material	PCI
Plásticos	26.363,38
Borracha	28.367,52
Papel	16.874,07
Couro	15.183,74
Têxteis	14.551,95
Madeira	10.543,68
Alimentos	5.485,22

Fonte: Adaptado DEA - EPE (2014, p. 25).

A fim de analisar a viabilidade da aplicação de resíduos sólidos urbanos para a incineração embora não de forma definitiva, a EPE, sugere que a classificação segundo o PCI seja levada em consideração, dessa forma supõe-se que para PCIs:

- Menores que 7008,2 kJ/kg a incineração não é tecnicamente viável;
- Entre 7008,2 e 8368 kJ/kg, para realizar a incineração necessita-se de um pré-tratamento para aumentar o PCI;
- Maior que 8368 kJ/kg torna-se viável a queima do material.

Analisando a tabela 3, pode-se observar que, exceto os alimentos que são considerados resíduos sólidos orgânicos, os demais materiais poderiam ser destinados para queima direta, entretanto, considerando somente os resíduos não recicláveis, para fins de uso como material para combustão, percebe-se que os plásticos são os que apresentam o maior potencial energético para serem utilizados.

Os plásticos com maior destinação aos aterros estão listados na tabela 4, bem como sua composição elementar e potencial energético em base seca (MACIEL et al, 2020; ANDRADE, 2005, p. 5).

Tabela 4 – Polímeros encontrados dispostos em aterros

Plásticos (polímeros)	Aplicação	Composição	Poder calorífico (kJ/kg)
Poliestireno (PS)	Carcaças de impressora, isopor em geral, copinhos	$(C_8H_8)_n$	40.720
Polipropileno (PP)	Filme colorido ou opaco ou laminado por dentro, filme transparente sem impressão	$(C_3H_6)_n$	44.158
Polietileno tereftalato (PET)	PET bandejas de ovos e verduras	$(C_{10}H_8O_4)_n$	21.850
Polietileno de baixa densidade (PEBD)	Filmes coloridos, filmes para embalar leites e outros alimentos, filme para fraldas descartáveis	$(C_2H_4)_n$	46.600
Policloreto de vinila (PVC)	Cadeiras, tubos e banners	$(CH_2CHCl)_n$	17.800

Fonte: Elaborado pela autora

Observa-se, através da tabela 4, que os polímeros destinados aos aterros são, em sua maioria, aqueles que não tem possibilidade de reciclagem física, possuem elevado poder calorífico e poucos componentes poluentes, comparados com os demais resíduos sólidos urbanos em sua composição, de forma que sua aplicabilidade para uso como combustível para a combustão em sistemas de geração de energia seja viável.

2.1.3 Potencial energético do RSU

Atualmente a aplicação da recuperação energética de resíduos sólidos urbanos vem crescendo consideravelmente. Ela se baseia na conversão de resíduos sólidos em combustível, energia térmica ou eletricidade, por meio de processos, tais como digestão anaeróbia, recuperação de gás de aterro sanitário, incineração e coprocessamento. É importante ressaltar que é requisito para os projetos de

recuperação energética a comprovação de sua viabilidade técnica e ambiental e a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental (MMA, 2022).

A combustão com a recuperação energética de RSU é a forma de aproveitamento que tem maior potencial de geração elétrica, ela pode ser utilizada para aproveitar o calor para produzir vapor, que vai movimentar uma turbina acoplada a um gerador. O processo de geração termelétrica a partir do RSU é o mesmo utilizado em usinas termelétricas convencionais, sua capacidade de geração dependendo basicamente do poder calorífico dos materiais (MMA, 2022).

Segundo a Nota técnica DEA 16/14 (2014), que aborda a economicidade e competitividade do aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, realizada pela EPE, uma usina a partir de resíduos sólidos urbanos tem como principais componentes: poço de armazenamento de RSU, câmara de combustão, sistema de movimentação do resíduo sólido na câmara de combustão (pode ser grelha móvel, jateamento de ar comprimido etc.), sistema de descarga de cinzas, sistema de geração de vapor, filtros, depurador de gases, ventilador e chaminé.

No Brasil, ainda não há a utilização deste tipo de tecnologia para uso de resíduos sólidos urbanos, porém há diversas plantas funcionando atualmente, ao redor do mundo, que podem ofertar entre 350 e 600 kWh/t dos RSU (DEA - EPE, 2014).

Diversos estudos estão sendo realizados para analisar a viabilidade da recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, através de variadas tecnologias, incluindo a combustão, contudo há um intenso debate acerca dos desafios que o aproveitamento energético do RSU traz devido as poucas informações disponíveis sobre a composição dos resíduos sólidos urbanos, principalmente em países em desenvolvimento onde a coleta não é devidamente realizada e conseqüentemente não há dados à disposição, além dos investimentos e custos desse tipo de aproveitamento frente as tecnologias já existentes (ANEEL, 2021).

No quadro 1 são destacados alguns estudos realizados sobre a incineração de RSU, bem como diversos parâmetros, vantagens e desvantagens listadas pelos autores, estes estudos servirão como base para determinação dos parâmetros a serem utilizados no ciclo de estudo do presente trabalho.

Quadro 1 – Estudos sobre aproveitamento energético através da incineração de resíduos sólidos urbanos

Local/Modelo de usina/Autor	Parâmetros	Vantagens	Desvantagens
<p>Local: Japão; Modelo de termelétrica: ciclo a vapor; Fonte: LIU et al (2020).</p>	<p><u>Dados do ciclo a vapor:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidade RSU: 170 t/d; • Razão de ar: 1,2; • PCI varia de 8.100 a 15.900 kJ/kg. • Vazão mássica do vapor: 10,8 kg/s. • Pressão: 5 MPa e Temperatura: 420°C; • Potência da turbina: 6.290 kW. • Eficiência ciclo: 20%. 	<ul style="list-style-type: none"> • Redução do volume de resíduos em aterros e controle de doenças relacionadas a contaminação que os aterros trazem. • Diminuição das emissões de carbono pela compensação de seu uso no lugar de combustíveis fósseis e redução da geração de metano gerado e liberado para atmosfera a partir de aterros sanitários. • A energia térmica da incineração de resíduos é também usada como calor para derreter a neve nas estradas 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de aterros para as cinzas, entretanto podem ser usadas junto ao cimento. • Alto custo de construção e operação. • Custo de venda da energia a partir do RSU podem não cobrir os custos de operação. • Riscos para a saúde humana. • Quantidade mínima de resíduos necessária para operação pode gerar conflito com as práticas de não geração, redução e reciclagem.
<p>Local: Proposta de usina para o Brasil. Modelo: Ciclo combinado com combustível no ciclo a gás sendo o gás natural e no ciclo a vapor um incinerador de RSU para reaquecimento. Fonte: SANTI (2012).</p>	<p><u>Dados ciclo a gás:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • PCI gás natural:38.000 kJ/kg; • Razão da mistura ar e gás natural: 2,14; • Temperatura de admissão do ar: 25°C; • Temperatura na saída da turbina a gás: 530°C; • Potência turbina a gás: 40 MW. <p><u>Dados do combustor:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • PCI_{RSU}: 5.000 kJ/kg; • Vazão mássica_{RSU}: 7,2 t/h de RSU; • Vazão mássica de ar: 93,6 t/h; • Razão ar/combustível: 1,62; <p><u>Dados do ciclo combinado</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Potência elétrica total: 57,6 MW; • Eficiência térmica do ciclo combinado: 54,2%. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da vida útil de aterros; • Recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos; • Contribuição para diminuição do aquecimento global (menos CO₂ liberado durante a decomposição nos aterros). 	<ul style="list-style-type: none"> • Gases provenientes da combustão dos resíduos sólidos urbanos que podem causar riscos à saúde; • Maiores custos devido à necessidade de tecnologias para controle das emissões.

<p>Local: Proposta de usina para o Brasil (baseado em modelo de usina Bilbao na Espanha); Modelo: Ciclo combinado com combustível no ciclo a gás sendo o gás natural e no ciclo a vapor um incinerador de RSU para reaquecimento; Fonte: CARNEIRO (2015).</p>	<p style="text-align: center;"><u>Dados RSU:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • PCI: 16.000 kJ/kg; • Vazão mássica: 48 t/h de RSU; <p style="text-align: center;"><u>Dados ciclo a gás:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • PCI gás natural: 47.730 kJ/kg; • Taxa de compressão ciclo a gás: 29,1; • Vazão mássica do gás: 125 kg/s; • Temperatura na saída da turbina a gás: 455°C; • Potência turbina a gás: 43 MW; • Eficiência do sistema a gás: 42%; <p style="text-align: center;"><u>Dados do ciclo a vapor:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Potência da turbina a vapor: 56,5 MW; • Pressão e saturação do vapor: 100 bar; • Condições de superaquecimento: 538-540°C e 100 bar; • Temperatura do vapor na entrada do incinerador: 160°C; • Vazão mássica do ciclo a vapor: 71,72 kg/s; • Eficiência do sistema a vapor: 26%; • Eficiência térmica do incinerador: 79%; • Potência elétrica total: 126,92 MW; • Eficiência térmica do ciclo combinado: 32%. 	<ul style="list-style-type: none"> • Redução significativa na massa (cerca de 70%) e volume (aproximadamente 90%) do RSU. • Redução do impacto ambiental devido as tecnologias de controle de emissões dos gases, onde os níveis são baixos dos observados em comparação com as usinas termelétricas que usam combustíveis fósseis. • Redução da emissão de gás metano e da contaminação do lençol freático causados pelos aterros. • Destoxicação: pode destruir produtos orgânicos tóxicos e produtos aromáticos, observando as boas práticas de combustão dos resíduos (em altas temperaturas). A escória, produto da combustão, é, na maioria das vezes, um material inerte, podendo ser disposto em aterros sanitários comuns ou reaproveitado na indústria da construção civil para a produção de cimento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo elevado devido à complexidade dos equipamentos devido os RSU conterem compostos ácidos, as caldeiras, por exemplo, precisam ser revestidas de material resistente. • Baixo poder calorífico em comparação aos combustíveis tradicionais causando uma menor eficiência do processo. • Formação de poluentes durante a combustão que gera fuligem e materiais não queimados, cuja formação não pode ser evitada por boas técnicas de combustão. Desse modo é necessário a existência de controle de emissões atmosféricas, através de equipamentos que devem ter frequentes manutenções para remover os materiais poluentes por eles capturados, em sua maioria tóxicos, que devem ser dispostos em aterros industriais.
---	--	--	--

Fonte: Elaborado pela autora.

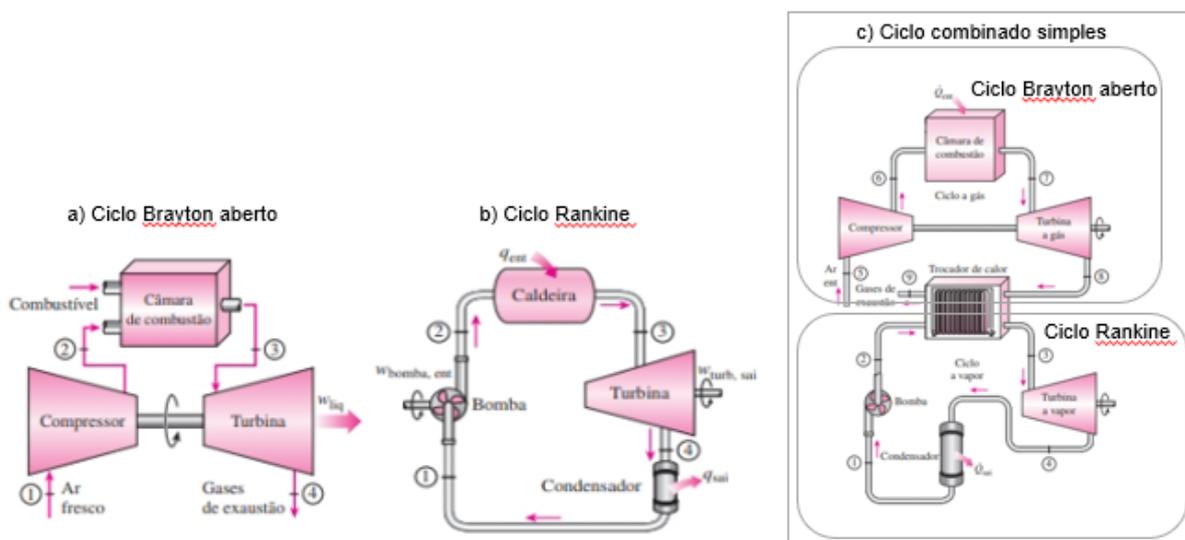
2.2 Ciclos térmicos para geração de energia elétrica

Dentre os ciclos térmicos para geração de energia elétrica tem-se o ciclo combinado que é formado, basicamente, por um ciclo de turbina a gás (Brayton) no topo de um ciclo à vapor (Rankine), os três ciclos são ilustrados na figura 1. Nesta configuração a energia térmica do ar que sai da turbina do ciclo Brayton passa por um trocador de calor onde é reaproveitada e transferida para o vapor de um ciclo Rankine, este aproveitamento ocorre devido ao fato das turbinas a gás operarem em temperaturas mais elevadas do que turbinas à vapor, proporcionando uma eficiência térmica superior do que cada ciclo operando separadamente (MORAN e SHAPIRO, 2006).

O ciclo Brayton é um ciclo termodinâmico usado em sistemas de turbinas a gás e pode ser modelado como ciclo aberto (figura 1, letra a) no qual o fluido é renovado a cada ciclo. Ele é composto por um compressor, uma caldeira/câmara de combustão e uma turbina a gás. Neste ciclo, o ar em condições ambientes, sendo considerado um gás ideal, é admitido no compressor onde tem sua temperatura e pressão elevadas, a partir passa para o trocador de calor, ou caldeira, onde ele é aquecido por uma fonte externa a uma pressão constante, após, os gases de combustão entram na turbina na qual produzem potência e se expandem sendo liberados para a atmosfera ou podem ser reaproveitados em um ciclo combinado (ÇENGEL e BOLES, 2013; MORAN e SHAPIRO, 2006).

O ciclo ideal Rankine (ilustrado na figura 1, letra b), é um ciclo utilizado para geração de potência através de turbinas a vapor. Seus componentes básicos são: bomba, caldeira/trocador de calor, turbina a vapor e condensador. Neste ciclo, água é admitida em uma bomba como líquido saturado e é comprimida até que esteja na pressão da caldeira onde ela entra como líquido comprimido e sai como vapor superaquecido, após passa por uma turbina para geração de potência, segue para o condensador como uma mistura (líquido e vapor) e retorna para a bomba, no estado de líquido saturado, completando o ciclo (ÇENGEL e BOLES, 2013).

Figura 1 – Ciclo Brayton, ciclo Rankine e ciclo combinado simples



Fonte: Adaptado de ÇENGEL e BOLES, 2013.

Há, também, a configuração de ciclo combinado com reaquecimento no ciclo a vapor, no qual o vapor após passar pela turbina retorna ao trocador de calor para reaquecer e passar novamente pela turbina para assim ir para o condensador e realizar o ciclo novamente. Esse método é utilizado em modernas usinas à vapor a fim de resolver o problema de umidade excessiva nas turbinas. A eficiência do ciclo pode ser aumentada em 4 a 5% (ÇENGEL e BOLES, 2013).

2.3 Tipos de incineradores

Há diferentes tecnologias para a combustão de resíduos sólidos urbanos, dentre as quais destacam-se: fornos rotativos, combustão em leito fluidizado, combustão em grelha e combustão em câmaras múltiplas.

2.3.1 Forno rotativo (sólidos e líquidos)

O forno rotativo pode processar resíduos na forma sólida e líquida, é muito utilizado para incinerar resíduos perigoso devido à sua maleabilidade e capacidade de tratar diferentes tipos de resíduos. Sua forma é cilíndrica horizontal montado sobre uma pequena inclinação e revestido internamente com refratários. A câmara

pós-combustão acoplada ao forno recebe os gases e cinzas dele provenientes, completando completamente a queima desses gases (BRITO, 2013).

2.3.2 Combustão em Leito Fluidizado

O incinerador de leito fluidizado parte do princípio da suspensão do material num fluxo de ar ascendente onde uma pequena quantidade de combustível é misturada a quantidades razoáveis de material inerte a altas temperatura promovendo então a queima, desse modo, os resíduos são carregados de forma triturada e são fluidizados pelo ar de combustão. As cinzas são coletadas pelo sistema de limpeza de gases ou então por descargas programadas pela base do leito (BRITO, 2013; CARNEIRO, 2015).

2.3.3 Combustão em grelha

É o tipo de equipamento mais utilizado para a combustão de RSU. A grelha inclinada, do tipo basculante, recebe o RSU e o desloca pela câmara de combustão onde vai aquecendo-o e promovendo a secagem, perda de compostos orgânicos voláteis, a combustão destes resíduos e por fim sua saída da câmara de combustão. A temperatura de região sobre a grelha atinge 1.200°C, decompondo a maioria dos compostos orgânicos em água e CO₂. Devido a presença de gases corrosivos é necessário que seja revestida de material resistente como o inonel (CARNEIRO, 2015).

2.3.4 Combustão em câmaras múltiplas

São geralmente utilizadas para tratar resíduos sólidos de saúde (RSS), são compostas geralmente de câmara revestida de refratário com uma capacidade de tratar 0,2 a 200 toneladas de resíduos sólido bruto por dia (CARNEIRO, 2015).

2.4 Controle de emissões atmosféricas

O controle de emissões é uma etapa essencial para se obter o licenciamento de operação de uma Usina de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos

Urbanos (URE). Considerando que as usinas termelétricas são grandes causadoras de emissões atmosféricas e gases de efeito estufa, a devida avaliação de equipamentos para controle de emissões no projeto da URE torna-se indispensável para reduzir os impactos ambientais advindos destas (IEMA, 2016).

As principais emissões atmosféricas emitidas em uma usina de geração termelétrica são: Material Particulado (MP), Óxidos de Enxofre (SO_x), Óxidos de Nitrogênio (NO_x), Dióxido de Carbono (CO₂), Monóxido de Carbono (CO), e Metais Pesados que variam de acordo com a característica química do combustível utilizado (CARNEIRO, 2015; RINTZEL, 2019).

Como forma de controle de algumas dessas emissões pode-se citar as boas práticas de combustão que, segundo Carneiro (2015), consistem em garantir a combustão completa através do monitoramento e excesso do ar (evitando emissões de CO e compostos orgânicos voláteis), tempo de residência do material e gases na câmara de combustão (pode variar de 0,8 a 2 segundos), manter a temperatura de combustão elevada (recomendado em torno de 1.200°C que inibe fortemente a formação de dioxinas e furanos assim como minimiza a formação de compostos orgânicos voláteis) e realizar manutenção dos equipamentos periodicamente.

Além das boas práticas de combustão é necessário que sejam aplicadas tecnologias para controle de emissões, a seguir serão descritas as principais tecnologias, explanadas pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) na Nota Técnica da série Termoeletricidade em Foco - Geração Termoelétrica e Emissões Atmosféricas: Poluentes e Sistemas de Controle (2016), disponíveis para cada tipo de emissão.

2.4.1 Material Particulado (MP)

Segundo IEMA (2016), materiais particulados são partículas de pequenos diâmetros (geralmente entre 1µm e 1 mm) exauridas junto aos gases para a atmosfera. Podem resultar do processo de combustão incompleta ou cinzas que não são combustíveis. As principais tecnologias disponíveis, segundo nota técnica disponibilizada pelo IEMA (2016), para controle de emissão de MP estão listadas abaixo:

- Precipitadores Eletroestáticos: funcionam através da aplicação de cargas elétricas para separar partículas dos fluxos de gás. As

partículas eletricamente carregadas são atraídas e coletadas nas placas eletrificadas com cargas opostas e o gás limpo flui pelo equipamento. As placas devem ser limpas periodicamente. Possuem eficiência de remoção de 94,8% a 99,5%.

- Filtros de Manga: nessa tecnologia o fluxo de ar carregado com partículas de poeira é forçado por uma bolsa de pano. Quando o fluxo com as partículas passa pelo pano, a poeira acumula neste pano, criando um fluxo de ar limpo. Esses filtros podem ser de diversos materiais e devem ser limpos periodicamente. Possuem eficiência de 99,8 a 99,9%.
- Ciclones: removem as partículas fazendo com que os gases fluem em forma de espiral dentro da tubulação. Devido à força centrífuga, as partículas maiores se movem para fora do fluxo e colidem com as paredes do tubo, após, elas escorregam pela parede do tubo e caem no fundo do ciclone, para serem removidas posteriormente. Não são muito eficientes, sendo mais utilizados como pré-coletores antes dos demais equipamentos de controle de emissão.

2.4.2 Óxidos de Enxofre (SO_x), Ácido Clorídrico (HCl) e Ácido Fluorídrico (HF)

Os óxidos de enxofre são originados da queima de qualquer material que tenha enxofre na composição. Podem formar ácidos que causam efeitos ambientais diversos. O ácido clorídrico pode ser formado sempre que algum material (em sua maior parte plástico PVC e alguns tipos de papeis) tiver cloreto em sua composição, possui poder corrosivo além de formar chuva ácida. O ácido fluorídrico tem sua origem a partir de materiais compostos de fluoreto e são altamente corrosivos (IEMA, 2016; CARNEIRO, 2015).

As principais tecnologias no controle de emissão de óxidos de enxofre, segundo IEMA (2016) e Carneiro (2015), são listadas abaixo:

- Separadores úmidos: parte da premissa do impacto e interceptação das partículas de poeira por parte de gotículas de água, neste caso as gotículas maiores e mais pesadas são separadas do gás limpo devido a ação da gravidade. Essa tecnologia também controla as emissões de

MP, metais pesados, Ácido Fluorídrico (HF) e Ácido Clorídrico (HCl). Possuem eficiência de remoção entre 92 e 98%, dependendo das características das partículas.

- Separadores semi-secos: funcionam de forma similar aos separadores úmidos, contendo maior quantidade de adsorvente assim no momento em que a água da solução adsorvente se mistura com os gases de exaustão contendo SO_x ela evapora gerando um resíduo sólido seco que deve ser captado pela tecnologia de controle de material particulado. Essa tecnologia possui eficiência entre 80 e 90%, dependendo das condições de operação da usina.
- Separadores secos: esse tipo de tecnologia injeta de forma pneumática o adsorvente, que pode ser reagente alcalino como cálcio, hidróxido de cálcio ou sódio, diretamente dentro da caldeira, no economizador ou na tubulação. O resíduo seco é então removido utilizando o sistema de controle de material particulado. Possuem eficiência de 50 a 60% para adsorventes de cálcio e cerca de 80% para adsorventes de sódio.

2.4.3 Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

Segundo o IEMA (2016), os óxidos de nitrogênio são formados sempre que o combustível é queimado na presença de ar e contribuem para acontecimento da chuva ácida. As tecnologias mais relevantes disponíveis para controle de emissões de óxidos de nitrogênio são listadas a seguir:

- Redução catalítica seletiva (SCR): nesta tecnologia os óxidos de nitrogênio são reduzidos ao gás nitrogênio (N_2), através da injeção do gás redutor, que pode ser amônia, ureia, hidrogênio, monóxido de carbono e até mesmo ácido sulfídrico, na saída do catalisador que ao entrar em contato com os gases de escape reage gerando nitrogênio e água. Possuem eficiência entre 80 e 90%.
- Queimadores de baixa emissão de NO_x (Tecnologia Low- NO_x): inibem a formação de óxidos de nitrogênio através do controle da mistura ar/combustível. Os queimadores possuem três bicos, um bico para injetar a mistura ar/combustível e outros dois para o ar, possibilitando o

ajuste da proporção de ar e combustível de maneira sub-estequiométrica (oxigênio abaixo da proporção estequiométrica) na primeira zona de queima e fornece excesso de oxigênio nas demais zonas.

2.4.4 Monóxido de Carbono (CO)

O monóxido de carbono é um produto resultante da combustão incompleta de produtos com carbono em sua composição, sua emissão é realizada através do monitoramento da combustão, e manutenção e regulagem do sistema de operação padrão, sendo essas práticas suficientes para manter dentro dos padrões de emissões (CARNEIRO, 2015).

2.4.5 Furanos e dioxinas

Segundo Carneiro (2015), furanos (PCDD) e dioxinas (PCDF) tem sua remoção por lavadores facilitada quando são removidos os compostos clorados, ou ao menos que as temperaturas estejam abaixo de 177°C, está condicionada a capacidade de remoção dos removedores de gases.

2.4.6 Metais pesados

Os principais materiais produtores de metais pesados são as baterias de automóvel, baterias comuns e aparelhos eletrônicos. A principal forma de evitar as emissões de metais pesados é realizar a separação desses materiais, na etapa de segregação dos resíduos, para que estes não cheguem à câmara de combustão. Em termos de equipamentos de controle de emissão, os filtros de manga (tecido) podem ser usados dessa forma enquanto os gases resfriam os metais pesados vaporizados condensam em partículas e são capturados (CARNEIRO, 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

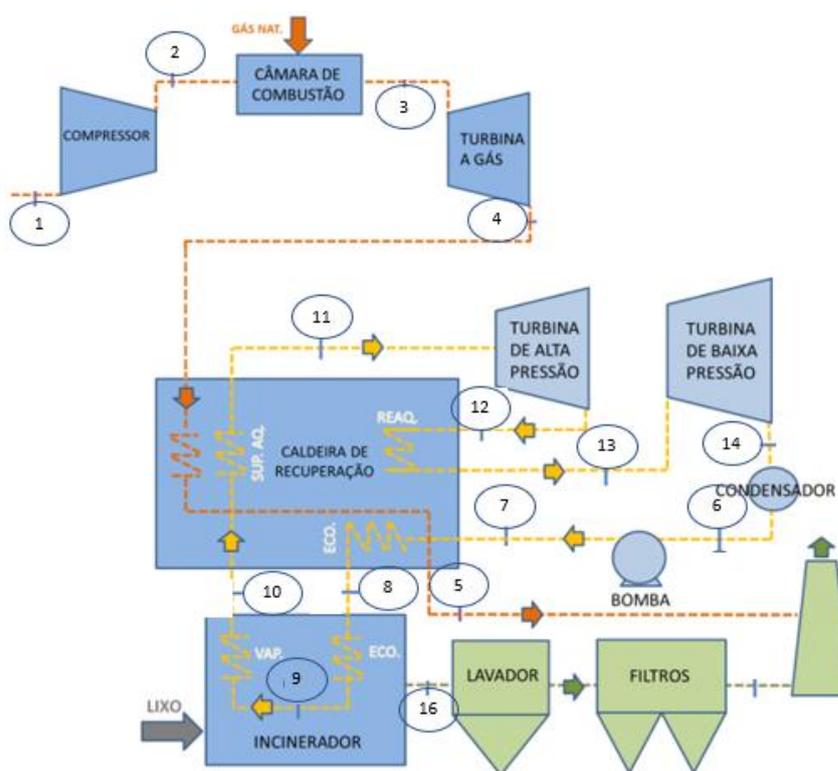
Visando o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos em um ciclo combinado híbrido com reaquecimento, através da análise energética e

ecológica deste, este capítulo traz os materiais e métodos utilizados para estas análises. A partir da verificação do volume de controle em cada equipamento do ciclo combinado, são feitas as considerações com base na análise energética apresentada neste capítulo com a simulação realizada através do Engineering Equation Solver (EES).

3.1 Ciclo de estudo

O ciclo proposto para este trabalho é o ciclo combinado híbrido adaptado de Carneiro (2015), ilustrado na figura 2, ele é determinado híbrido por utilizar dois combustíveis diferentes para cada ciclo termodinâmico.

Figura 2 – Ciclo combinado híbrido proposto



Fonte: Adaptado de CARNEIRO (2015, p. 69).

O ciclo a gás é alimentado com gás natural como combustível devido ao seu alto poder calorífico e garantia de fornecimento contínuo. O sistema a gás é composto pelos seguintes volumes de controle: compressor, câmara de combustão de gás natural e turbina a gás.

No ciclo a vapor tem-se como combustível os resíduos sólidos urbanos plásticos não recicláveis. O sistema a vapor é composto pelos seguintes volumes de controle: caldeira tipo grelha móvel para combustão de resíduos sólidos urbanos, o incinerador que contém um boiler com economizador e evaporador, nos quais os tubos expostos à caldeira são revestidos com inconnel 625 para diminuir as taxas de corrosão, turbina a vapor de dois estágios (alta e baixa pressão), condensador, bomba e caldeira de recuperação na qual é feito o reaproveitamento da energia térmica fornecida pelos gases do ciclo a gás (aquecido por gás natural) no ciclo a vapor sendo composta pelo superaquecedor, reauecedor e economizador (CARNEIRO, 2015).

Os parâmetros utilizados para realização da simulação foram obtidos com base na literatura (ÇENGEL e BOLES, 2013; MORAN e SHAPIRO, 2006; EPE, 2014) e em estudos similares ao proposto neste trabalho (CARNEIRO, 2015; RINTZEL, 2019; RODRIGUES, 2019), eles estão dispostos no Apêndice A.

3.2 Análise energética

A análise energética quantifica o potencial de uso de um sistema no qual baseia-se no princípio da conservação de energia e de massa. As equações para análise energética de cada componente do ciclo combinado híbrido com reauecimento no ciclo a vapor estão dispostas no Apêndice B deste trabalho.

Para avaliação da potência líquida do ciclo não foram considerados as potências consumidas por equipamentos internos de uma usina como: ventiladores, bombas de recirculação de água nos lavadores e resfriamento, e equipamentos de controle de emissão etc. Somente foram considerados os equipamentos que compõem o ciclo combinado em estudo (ciclo Brayton e ciclo Rankine).

Para a análise energética tem-se as seguintes hipóteses:

- a) O sistema opera em regime permanente;
- b) O fluido de trabalho do ciclo a gás é modelado como ar;
- c) Os gases de exaustão do incinerador são modelados como ar;
- d) Cada componente é modelado com um volume de controle;
- e) Variação de energia cinética considerada desprezível;
- f) Variação de energia potencial considerada desprezível;
- g) Componentes operam adiabaticamente.

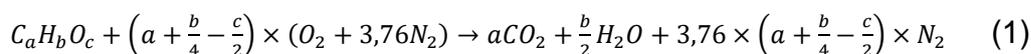
3.3 Análise ecológica do ciclo proposto

A análise ecológica visa, através do indicador de eficiência ecológica, mensurar os impactos ambientais provindos da poluição atmosférica da geração termelétrica.

3.3.1 Produtos da combustão

Os produtos da combustão podem ser encontrados através da aplicação do cálculo estequiométrico, este pode ser feito através de dois modos, quando se tem o conhecimento da composição molecular do combustível ou quando se tem o combustível com a formulação em base mássica conhecida. O desenvolvimento das equações de cálculo estequiométrico foi baseado em Kotz et al (2016) e Gomes (2013).

O cálculo estequiométrico a partir do conhecimento da composição molecular do combustível é realizado através da equação 1.

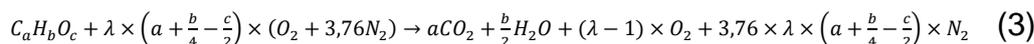


Os coeficientes a, b e c representam, respectivamente, a quantidade dos elementos carbono, hidrogênio e oxigênio na composição do material combustível.

A relação entre ar e combustível na câmara de combustão pode ser encontrada através da equação 2, na qual a massa de cada um é calculada considerando a quantidade mols de e a massa atômica dos componentes.

$$\frac{A}{C} = \frac{m_{ar}}{m_{combustivel}} \quad (2)$$

Para se garantir uma combustão completa, a fim de evitar emissões de CO e controlar a temperatura de combustão, em situações reais é comum utilizar o ar acima da quantidade estequiométrica, ou seja, utiliza-se o ar em excesso ($\lambda > 1$), dessa a forma a reação de combustão passa ser a equação 3, na qual λ representa o coeficiente de excesso de ar.



A segunda opção é quando se possui conhecimento da formulação em base mássica do combustível, o cálculo para determinação da massa de ar estequiométrico é dado pela equação 4.

$$m_{ar} = 11,5 \times \left(\frac{\%C}{100}\right) + 34,8 \times \left(\frac{\%H}{100}\right) + 4,35 \times \left(\frac{\%S}{100}\right) - 4,35 \times \left(\frac{\%O}{100}\right) \quad (4)$$

3.3.2 Eficiência ecológica

Segundo Cardu & Baica (1999), Silveira et al (2007), Carneiro (2015) e Santos (2016), a eficiência ecológica é um indicador que permite avaliar o desempenho ambiental de uma usina termelétrica comparando os principais gases poluentes com padrões de qualidade do ar.

Esse indicador é calculado através da equação 5.

$$\eta_{ecologica} = \sqrt{0,204 \times \eta_{ciclo\ combinado} \times \frac{\ln(135-IP)}{\eta_{ciclo\ combinado} + IP}} \quad (5)$$

Na qual $\eta_{ecologica}$ é a eficiência ecológica, $\eta_{combinado}$ é a eficiência do ciclo combinado, IP é o indicador de poluição, em kg/MJ.

O indicador de poluição é conhecido através da relação entre o fator de emissão de dióxido de carbono (kg de CO₂ equivalente por kg de combustível) e o poder calorífico inferior do combustível, pode ser encontrado através da equação 6.

$$IP = f_{CO_2e}/PCI \quad (6)$$

O fator de emissão de CO₂ equivalente para a combustão do RSU, segundo Carneiro (2015), pode ser estimado através da equação 7.

$$f_{CO_2e} = f_{CO_2} + 80 \times f_{SO_2} + 50 \times f_{NO_x} + 67 \times f_{MP} \quad (7)$$

A eficiência ecológica pode variar de 0 a 100%, sendo que 0% indica que a poluição do sistema é máxima e o valor de 100% indicando que o sistema possui poluição zero (situação ideal) (CARNEIRO, 2015).

Seu valor varia de acordo com as características dos combustíveis utilizados, Cardu & Baica (1999) encontraram uma eficiência ecológica de 90% para uma usina termelétrica utilizando gás natural, Silveira et al (2007) encontraram para usina com combustível diesel uma eficiência ecológica de 94%, enquanto Sotomonte (2009) encontrou para uma usina termelétrica utilizando carvão betuminoso como combustível um valor de eficiência ecológica de 73% (ressaltando que a eficiência ecológica nesse caso varia de acordo com a qualidade do carvão e a umidade presente, bem como o poder calorífico). Já Carneiro (2015), encontrou para uma queima bruta de resíduos sólidos urbanos em uma usina termelétrica uma eficiência ecológica de 89%.

3.4 Engineering Equation Solver (EES)

O EES é um programa, da empresa F-CHART, que permite solucionar diversas equações, possuindo um vasto banco de dados e de propriedades termodinâmicas para diversas substâncias, possibilitando realizar diversas simulações para fins de análises termodinâmicas. O programa possui diversas versões, de acordo com o sistema computacional (32 ou 64 bits) e para uso profissional ou estudantil. Neste trabalho foi utilizado a versão estudantil do programa (F-CHART, 2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da simulação realizada no EES do ciclo combinado híbrido com a configuração de reaquecimento no ciclo a vapor, desenvolvida com base nas propriedades e parâmetros assumidos, foram encontrados os valores para as propriedades pressão, temperatura, entalpia e entropia, indicados no Apêndice C. As linhas de simulação encontram-se no Apêndice K. Com base nos valores das propriedades encontradas pode-se elaborar o gráfico de entropia versus temperatura, para os ciclos a gás e a vapor, esses gráficos se encontram nos Apêndices E e F, respectivamente, e demonstraram que os ciclos apresentaram o comportamento esperado conforme as entradas definidas.

Na tabela 5 estão indicados os parâmetros dos combustíveis utilizados pelo estudo similar de Carneiro (2015) e do sistema proposto no presente estudo.

Tabela 5 – Parâmetros do estudo de Carneiro e do sistema proposto

Parâmetro	Estudo de Carneiro (2015)	Estudo proposto
Vazão mássica de combustível no incinerador do ciclo Rankine	48 t/h	20 t/h
Vazão de gás natural consumido na câmara de combustão	17.995 Nm ³ /kg	13.123 Nm ³ /kg
PCI do gás natural	47.730 kJ/kg	36.819,20 kJ/kg
PCI dos resíduos sólidos	16.000 kJ/kg	20.535,36 kJ/kg (plástico)

Fonte: Elaborada pela autora.

O gás natural foi o combustível utilizado para câmara de combustão do ciclo a gás, visto que possui um maior poder calorífico, seu valor pode variar para cada literatura, neste trabalho foi assumido o valor de 36.819,20 kJ/kg, de acordo com o Plano Nacional de Energia 2030 (Ministério de Minas e Energia e EPE, 2007), devido ao fato desse ser o valor do PCI mais encontrado do gás natural do Brasil. No ciclo a gás não foi utilizado o RSU como combustível devido a necessidade do tratamento dos gases de combustão antes deles entrarem na turbina, pois dependendo da característica dos resíduos sólidos urbanos podem conter gases altamente corrosivos que comprometeriam o sistema.

Para o ciclo a vapor, Carneiro (2015), em seu estudo proposto considerou a combustão de massa bruta como forma de incineração dos resíduos sólidos urbanos, ou seja, todos os tipos de RSU são utilizados no combustor. No presente estudo foram considerados somente os plásticos não recicláveis como combustível para utilização no combustor do ciclo a vapor, devido ao seu maior potencial energético em comparação aos demais RSU, seu grande volume disponível em aterros (segundo maior volume depois dos resíduos orgânicos), sua caracterização e composição, visto que não possui metais pesados e nem enxofre em sua composição. Dentre os benefícios do uso dos plásticos não recicláveis para a combustão como forma de aproveitamento energético pode-se citar o aumento da vida útil dos aterros já que constituem um grande volume destes locais, contribuição para a diminuição das poluições do solo do local e emissões de CO₂ dado que levam anos para se desintegrar no ambiente quando dispostos de forma irregular.

A quantidade de resíduos plásticos utilizados na combustão foi baseada na geração de resíduos sólidos urbanos da cidade de Porto Alegre e de municípios vizinhos, descontados o percentual de reciclagem e considerando o percentual de plásticos no total de resíduos sólidos urbanos gerados, chegando à capacidade de aplicar uma vazão mássica de RSU de 20 t/h, que equivale a 480 toneladas por dia e um total anual de 165.400 toneladas. Os valores estimados de geração de RSU foram calculados considerando informação do relatório da ABRELPE (2021), de geração 0,805 kg_{rsu}/hab para a região Sul e a quantidade de habitantes dos municípios segundo censo do IBGE de 2010, encontrado no Apêndice L. Devido a isso, esse valor difere da quantidade de resíduos considerada por Carneiro (2015)

que considerou um estilo de queima bruta de todos os tipos de resíduos sólidos urbanos.

4.1 Análise energética

A partir da análise energética é possível realizar os cálculos de potência e eficiência energética do ciclo combinado proposto neste estudo, eles estão dispostos no Apêndice D. Na tabela 6, dispõe-se os resultados encontrados nesse estudo.

Tabela 6 – Potência e eficiência calculada para o ciclo combinado

Parâmetro	Estudo proposto
Potência elétrica líquida do ciclo combinado	82,8 MW
Eficiência energética do ciclo combinado	38%

Fonte: Elaborado pela autora

A potência elétrica líquida fornecida pelo ciclo combinado do estudo proposto foi de 82,8 MW, com uma geração anual, considerando 8.270 horas anuais de operação da usina (demais horas são destinadas à manutenção), de 684.756 MWh, capaz de atender aproximadamente 9% da demanda da cidade Porto Alegre e municípios limítrofes (considerando um consumo médio de 2.900 kWh anualmente por habitante para a região Sul, segundo Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020, EPE).

No sistema proposto são gerados cerca de 4.140 kWh de potência elétrica por tonelada de resíduos sólidos urbanos, e considerando somente a potência do ciclo a vapor ele gera aproximadamente 1.991 kWh/t de RSU. De acordo com a EPE (2014) usinas termelétricas operando somente com resíduos sólidos urbanos geram em torno de 300 a 600 kWh/t, e segundo Carneiro (2015) o maior valor de potencial de geração encontrado foi de 900 kWh/t em um ciclo otimizado, deste modo observa-se que a utilização dos plásticos não recicláveis como combustível na combustão do ciclo a vapor em comparação com a queima de massa bruta de todos os tipos de resíduos sólidos apresenta um maior potencial de conversão em potência elétrica por tonelada de combustível, entretanto o valor encontrado neste trabalho foi superior por haver a parcela de geração do gás natural na potência do ciclo a vapor.

O ciclo a gás apresentou uma eficiência energética de 43%, conforme já esperado devido às definições de entrada assumidos e especificações do fabricante dos componentes. O ciclo a vapor apresentou uma eficiência energética de 26%, valor dentro do esperado para um ciclo Rankine que geralmente opera na faixa de eficiência de 20 a 30% (Carneiro, 2015), em comparação com outras fontes de energia, por exemplo, a energia solar fotovoltaica que varia sua eficiência entre 13 a 22% (módulos fotovoltaicos monocristalinos) o ciclo apresentou um valor superior de eficiência, o que indica a viabilidade do uso dos resíduos sólidos urbanos plásticos não recicláveis para aplicação neste tipo de ciclo.

O ciclo combinado foco do estudo apresentou uma eficiência energética de 38%, ou seja, de toda a potência térmica fornecida pela combustão do gás natural no ciclo a gás e do RSU (plásticos não recicláveis) no ciclo a vapor, esse percentual é transformado em potência líquida do ciclo, o restante é parte utilizado para funcionamento dos ciclos (compressor e bomba), e parte é perdido devido às irreversibilidades e perdas térmicas do sistema. Esse valor de eficiência encontrado é um resultado dentro do esperado, já que conforme estudos similares (SANTI, 2012; CARNEIRO, 2015) realizados a eficiência dos ciclos combinados se encontram acima de 30% e em alguns casos podem chegar até 60%, dependendo dos combustíveis que serão utilizados.

4.2 Análise ecológica

As emissões resultantes da combustão do gás natural, com composição elementar apresentada na tabela 7, são: dióxido de carbono, óxidos nitrosos, dióxidos de enxofre, e materiais particulados (SANTOS, 2016).

Tabela 7 – Composição elementar do gás natural

Componentes	Fórmula	Porcentagem Volumétrica (%)
Metano	CH ₄	89,24
Etano	C ₂ H ₆	7,86
Propano	C ₃ H ₈	0,24
Dióxido de Carbono	CO ₂	1,25
Nitrogênio	N ₂	1,34
Oxigênio	O ₂	0,07

Fonte: Adaptado de Cegás, 2022.

No presente trabalho foi considerado como combustível do combustor do ciclo a vapor os resíduos sólidos urbanos provindos dos plásticos não recicláveis, uma vez que dentro do combustor há uma mistura dos mais diversos tipos de plásticos, para conhecimento dos gases produtos da combustão foi considerada o cálculo conforme equação 4, base mássica conhecida, com valores indicados na tabela 2. Considerado um excesso de ar de 10% a fim de realizar a combustão completa, os produtos da combustão encontrados foram: CO₂, água, oxigênio e cinzas, entretanto o processo real há diversos outros poluentes.

No processo real observa-se os seguintes poluentes: a geração de cinzas de fundo, cinzas volantes, água de limpeza dos gases, lama do tratamento da água e os próprios gases da combustão. Se houver a presença de plásticos que possuem cloreto em sua composição, por exemplo, PVC, tem-se a emissão atmosférica de ácido clorídrico (HCl), além destes são emissões atmosféricas da combustão de resíduos sólidos urbanos: dioxinas e furanos, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono (em casos de combustão incompleta), ácido fluorídrico, óxidos de enxofre e metais pesados (em casos de presença de material com metal na composição) (CARNEIRO, 2015; RINTZEL, 2019; IEMA, 2016).

Carneiro (2015), cita como exemplo a usina de Zabalgardi, em operação na Espanha com características que serviram como base para este trabalho, trazendo as principais emissões atmosféricas medidas no ano de 2014 e os limites estabelecidos pela União Europeia, esses valores estão apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Concentrações de poluentes atmosféricos da Zabalgardi

Emissões	ZABALGARDI (mg/Nm³) (2014)	Limite UE (mg/Nm³)
NO_x	148	200
HCl	3,62	10
COT	0,87	10
CO	5,58	50
HF	0,21	1
NH₃	2,33	30
SO₂	5,44	50
Pb+Cr+Cu+Mn+As+Ni+Sb+Co+V	0,0118	0,5
Hg	0,0012	0,05
Cd+TI	0,0013	0,05
Dioxinas e furanos	0,0027 (ng/ Nm ³)	0,1 (ng/ Nm ³)

Partículas	1	10
-------------------	---	----

Fonte: Adaptado de CARNEIRO, 2015, p. 39.

A eficiência ecológica do ciclo proposto, calculada através da equação 5 e com demais cálculos apresentados no Apêndice H, resultou em 91%, esse valor está dentro dos padrões dos ciclos combinados, como Carneiro (2015) que obteve uma eficiência ecológica de 89%, Silveira et al (2007) que encontraram para um ciclo a diesel e gás natural, valores de 91% e 94%, respectivamente, e Cardu & Baica (1999) que encontraram para o gás natural uma eficiência ecológica de 90%, e Sotomonte (2009) que encontrou para o carvão betuminoso uma eficiência ecológica de 73%.

Analisando a eficiência ecológica e as emissões medidas pelo sistema de Zabargarbi (2014) em comparação com os limites estabelecidos percebe-se que as emissões desse ciclo estão dentro dos limites aceitáveis, lembrando que essa situação apenas ocorre devido à boas práticas de combustão e uso de tecnologias de controle de emissões, que no exemplo de Zabargarbi, segundo Carneiro (2015), é composto por filtros e lavadores, uso de filtros de manga para captura de material particulado, além da prática de monitoramento contínuo das emissões atmosféricas.

A partir das considerações realizadas neste capítulo pode-se concluir que o uso de resíduos sólidos urbanos é viável para ciclos combinados como combustível, constituindo-se uma fonte alternativa de energia, porém é necessário outro combustível (de confiabilidade, geralmente fóssil) para garantir a operacionalização (conforme determina a Portaria Interministerial nº 274), eficiência e geração de maiores potências. Desse modo, uma análise envolvendo os custos relacionados a operacionalização e manutenção é necessária para verificar sua viabilidade econômica em comparação com as termelétricas convencionais.

O uso dos plásticos resolve em parte o problema dos aterros, pois cerca de 16% de resíduos plásticos deixariam de ir para aterros para serem usados na combustão, dessa forma aumentando a vida útil desses locais. Lembrando que a combustão dos resíduos sólidos urbanos se dará como última forma de aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos antes de serem determinados como rejeitos e levados para aterros. A prioridade no ciclo de vida dos resíduos sólidos urbanos deve seguir sempre esses 3 passos: a redução, a reutilização e a reciclagem na qual a recuperação energética a partir da combustão faz parte.

O artigo desenvolvido pode servir como base para futuros estudos que visem a utilização da recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, outras formas de aproveitamento energético podem ser aplicadas aos resíduos sólidos urbanos como por exemplo: utilização de outro RSU para combustão, a gaseificação e a pirólise, bem como a avaliação da possibilidade de integrar ciclo combinado do estudo em sistemas já operantes como, por exemplo, a Usina de Minas do Leão que é uma termelétrica que utiliza biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo foi apresentado a simulação de um ciclo combinado híbrido com reaquecimento no ciclo a vapor visando analisar a viabilidade do uso dos resíduos sólidos urbanos como combustível.

Através da revisão bibliográfica verificou-se que a aplicação direta da queima em massa dos resíduos sólidos urbanos na câmara de combustão do ciclo a gás é possível somente com o tratamento dos gases de combustão antes deles entrarem na turbina, pois dependendo da característica dos resíduos sólidos urbanos podem conter gases altamente corrosivos que comprometeriam o sistema. Assim o gás natural foi utilizado na câmara de combustão do ciclo a gás e os resíduos sólidos urbanos plásticos não recicláveis como combustível no combustor do ciclo a vapor, esse resíduo foi escolhido devido ao seu grande volume em aterros e potencial energético, considerando que os resíduos recicláveis já foram separados previamente à combustão.

Depois de realizadas as devidas análises, pode-se observar uma eficiência de 38% para o ciclo combinado e uma potência elétrica líquida 82,8 MW capaz de atender cerca de 9% da energia elétrica total consumida pela cidade de Porto Alegre e municípios limítrofes.

Baseados na composição elementar dos combustíveis e nos cálculos estequiométricos foi realizado uma análise ecológica na qual pode-se perceber que o processo proposto apresentou uma eficiência ecológica de 91% e gerou como produtos de combustão emissões atmosféricas como: CO₂, HCl, NO_x, SO₂, material particulado, dioxinas e furanos sendo necessários uso de equipamentos de controle de emissões atmosféricas e realização de boas práticas de combustão.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos Urbanos 2021**. São Paulo. 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 14 mar. 2022.

ANEEL. I Seminário Desafios da Geração de Energia com Resíduos Sólidos Urbanos - 8/12/2021 - Parte 1. 09 dez. 2021. 1 vídeo (2 h 57 min 04 s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=dZk-fve7Qpk&t=62s>. Acesso em: 13 jan. 202.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 04 abr. 2021.

BRASIL. Ministério da Educação; Ministério do Meio Ambiente. **Informe Técnico: Potencial Energético dos Resíduos Urbanos**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-372/topico-492/Informe%20Urbano%20EPE-DEA-007-19%20-%20rev.pdf>. Acesso em: 15 maio 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Nota técnica DEA 18/14 - Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos**. p 1-50. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2018%20-%20%20Invent%C3%A1rio%20Energ%C3%A9tico%20de%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%20Urbanos%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Manual de Educação para o Consumo Sustentável**. Brasília. 2019. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/dmdocuments/publicacao8.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Nota técnica DEA 16/14- Estudo sobre a Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2016%20-%20%20Economicidade%20e%20Competitividade%20do%20Aproveitamento%20Energético%20d%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 15 maio 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília, DF: Presidência da República. 2020. p. 1-187. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2030>. Acesso em: 13 mar. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Gabinete do Ministro. Portaria Interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019. Disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º do art. 9º da Lei nº 12.305, de 2010 e no art. 37 do Decreto nº 7.404, de 2010. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, edição 83, p. 57, 05 maio 2019. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-interministerial-n%C2%BA-274-de-30-de-abril-de-2019-86235505>. Acesso em: 20 mar. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF: Presidência da República. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf. Acesso em: 13 mar. 2022.

BRITO, Adailton Pereira de. **Análise econômica preliminar da implantação de incinerador de resíduos sólidos urbanos na região de Bauru**. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista. Bauru. 2013. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91722/brito_ap_me_bauru.pdf?sequence=1. Acesso em: 29 mar 2022.

CARDU, M.; BAICA, M. A. **A seismic vision regarding a methodology to estimative globally the energy-ecologic efficiency of thermopower plants**. Energy Conversion and Management, v. 42, p. 1317 – 1325, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890400001382>. Acesso em: 27 maio 2022.

CARDU, M.; BAICA, M. **Regarding a global methodology to estimative the energy-ecologic efficiency of thermopowerplants**. Energy Conversion and Management, v.40, p.71 – 87, 1999. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890499000412>. Acesso em: 27 maio 2022.

CARNEIRO, Maria Luisa Nerys de Moraes. **Análise termoeconômica e ambiental de uma usina de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso da planta de zabalgarbi/bilbao adaptada para a realidade brasileira**. Tese (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2015. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=26682@1>. Acesso em: 07 abr. 2022.

CEGÁS. Companhia de Gás do Ceará. O gás natural. Disponível em: <https://www.cegas.com.br/gas-natural/o-gas-natural/>. Acesso em: 20 maio 2022.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill: Bookman, 2013.

FCHART SOFTWARE. Disponível em: <http://fchartsoftware.com/ees/>. Acesso em 14 maio 2022.

GOMES, Gabriel Meneghetti Faé. **Estudo dos aspectos de processo envolvidos na transição da combustão com ar atmosférico para oxidação em leito fluidizado borbulhante**. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/87335>. Acesso em: 29 abr. 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010**. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em: 20 maio 2022.

IEMA; VISCONDI, Gabriel; SILVA, Aline; CUNHA, Kamyla. Séria Termoeletricidade em Foco: **GERAÇÃO TERMOELÉTRICA E EMISSÕES ATMOSFÉRICAS: POLUENTES E SISTEMAS DE CONTROLE**. IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente. São Paulo. 2016. Disponível em: <https://iema-site-staging.s3.amazonaws.com/IEMA-EMISSOES.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2022.

KAZA, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank. 2018. **What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Urban Development;. Washington, DC: World Bank. © World Bank. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>. Acesso em: 24 maio 2021.

KOTZ, John C.; TREICHEL, Paul M.; TOWNSEND, John R.; TREICHEL, David A. **Química Geral e Reações Químicas - Volume 1 - Tradução da 9ª edição norte-americana**. São Paulo. Cengage Learning Brasil, 2016. 9788522118281. Disponível em: <https://cengagebrasil-ip.vitalsource.com/#/books/9788522118281/>. Acesso em: 25 abr. 2022.

LEME, Márcio Montagnana Vicente. **Avaliação das opções tecnológicas para geração de energia a partir dos resíduos sólidos urbanos: estudo de caso**. Tese (Pós-Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2010. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/1468/1/dissertacao_0037110.pdf. Aceso em: 24 abr. 2022.

LIU, Chen; NISHIYAMA, Toru; KAWAMOTO, Katsuya; SASAKI, So. **Waste to Energy Incineration**. CCET guideline series on intermediate solid municipal waste treatment technologies. 2020. Disponível em: <https://www.iges.or.jp/en/pub/ccet-guideline-wtei/en>. Acesso em: 01 maio 2022.

MACIEL, Joice; REIS, Daniel; BUENO, Andrielle; BARROZO, Andressa; MORAES, Carlos. Plásticos e suas embalagens, o que é reciclável e rejeito para o mercado da reciclagem em cooperativas de reciclagem. Observatório da Política Nacional de Resíduos Sólidos. **10 anos da Política Nacional de Resíduos Sólidos: caminhos e agendas para um futuro sustentável**. 1ª ed. São Paulo. 2020. P. 217 a p 227. Disponível em: https://opnrs.org.br/images/10_anos_da_Politica_de_Residuos_Solidos_caminhos_e_agendas_para_um_futuro_sustentavel_-_DOI_10116069786588109076_1pdf-_VF_compressed.pdf

MORAN, Michael J., SHAPIRO, Howard N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 5. ed. England: John Wiley & Sons Ltd, 2006.

PROGRAMA CIDADES SUSTENTÁVEIS. **Consumo de eletricidade per capita Porto Alegre**. 2015. Disponível em: <https://2013-2016-indicadores.cidadessustentaveis.org.br/br/RS/porto-alegre/consumo-total-de-eletricidade-per-capita>. Acesso em: 17 maio 2022.

RINTZEL, Patrik Alencar. **Revisão bibliográfica para a implementação de uma usina termelétrica a base de resíduos sólidos urbanos**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Centro Universitário UNIFACVEST, Lages, 2019. Disponível em: <https://www.unifacvest.edu.br/assets/uploads/files/arquivos/0d47f-rintzel,-p.-a.-revisao-bibliografica-para-a-implementacao-de-uma-usina-termeletrica-a-base-de-residuos-solidos-urbanos.-tcc,-2019..pdf>. Acesso em: 07 maio 2022.

RODRIGUES, Fernando. **Análise termodinâmica, exergética e termoeconômica de um ciclo combinado com resfriamento do ar de entrada**. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). São Leopoldo. 2019. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/8813>. Acesso em: 14 maio 2021.

SANTI, Alexandre. **Estudo da eficiência da geração de eletricidade a partir de gás natural e resíduos sólidos urbanos**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/75832/000891209.pdf?sequence=1>. Acesso em: 14 abr. 2022.

SANTOS, Caio Felipe de Paula. **Análise termoeconômica e eficiência ecológica de uma termoelétrica com absorção química de CO₂**. Tese (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Julho de Mesquita Filho” – Campus de Guaratinguetá. Guaratinguetá. 2016. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/138083/santos_cfp_me_guara.pdf;sequence=3. Acesso em: 20 abr. 2022.

SILVEIRA, J. L.; CARVALHO JR, J. A.; VILLELA, I. A. C. **Combined cycle versus one thousand diesel Power plants: pollutant emissions, ecological efficiency and economic analysis**. Renewable & Sustainable Energy Reviews, v. 11, p 524 – 535. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032105000432?via%3Dihub>. Acesso em: 25 maio 2022.

SOTOMONTE, César Adolfo Rodriguez. **Análise exergética, termoeconômica e ambiental de uma usina termoelétrica supercrítica a carvão mineral**. 2009. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

APÊNDICE A - TABELA DE VALORES DE ENTRADA ASSUMIDOS

Parâmetro	Sigla	Valor	Unidade	Fonte
Poder calorífico inferior do plástico (RSU)	PCI_{RSU}	20.535,36	kJ/kg	Média do PCI_{RSU} plástico (ANDRADE, 2005) com umidade de 40% (EPE, 2014)
Poder calorífico inferior do gás natural	PCI_{GN}	36.819,20	kJ/kg	(EPE – MMA, 2022)
Densidade do gás natural	P_{GN}	0,768	Kg/Nm ³	(Moran e Shapiro, 2006)
Eficiência do compressor	η_c	80	%	(CARNEIRO, 2015)
Potência Líquida do ciclo a gás	$W_{net,cg}$	43	MW	(CARNEIRO, 2015)
Vazão mássica de ar na saída da turbina a gás segundo fabricante	m_{tg}	125	kg/s	(CARNEIRO, 2015)
Heat Rate do conjunto a gás	HR	8.630	kJ/kWh	(CARNEIRO, 2015)
Constante do ar	R_{ar}	0,2870	kJ/kg.K	(Çengel e Boles, 2013)
Razão de compressão	R_c	29,1	-	(CARNEIRO, 2015)
Perda de carga na caldeira de combustão	$DP_{2,3}$	15	kPa	(CARNEIRO, 2015)
Perda de carga na caldeira de recuperação	$DP_{4,5}$	30	kPa	(CARNEIRO, 2015)
Perda de carga no economizador 1	$D_{7,8}$	200	kPa	(CARNEIRO, 2015)
Perda de carga no economizador 2	$DP_{8,9}$	200	kPa	(CARNEIRO, 2015)
Perda de carga no evaporador	$DP_{9,10}$	300	kPa	(CARNEIRO, 2015)
Perda de carga no superaquecedor (caldeira de recuperação)	$DP_{10,11}$	300	kPa	(CARNEIRO, 2015)
Perda de carga no reaquecedor(caldeira de reaquecedor)	$DP_{12,13}$	300	kPa	(CARNEIRO, 2015)
Perda de carga no condensador	DP_{cond}	5	kPa	(CARNEIRO, 2015)
Eficiência isentrópica da bomba	η_b	80	%	(CARNEIRO, 2015)
Eficiência isentrópica da turbina a vapor (alta e baixa)	η_{tv}	90	%	(CARNEIRO, 2015)
Temperatura na saída da turbina a gás	T_4	455	°C	(CARNEIRO, 2015)
Pressão na saída da turbina a gás	P_4	131	kPa	(CARNEIRO, 2015)
Pressão na entrada do compressor	P_1	101,325	kPa	(CARNEIRO, 2015)
Temperatura na entrada do compressor	T_1	20	°C	(CARNEIRO, 2015)
Pressão na saída da caldeira de recuperação para a torre	P_5	101,325	kPa	(CARNEIRO, 2015)

Temperatura na saída da caldeira de recuperação para a torre	T_5	150	°C	(CARNEIRO, 2015)
Pressão na entrada na caldeira de recuperação no ciclo a vapor	T_{10}	10.000	kPa	(CARNEIRO, 2015)
Temperatura na entrada da turbina de alta pressão no ciclo vapor	T_{11}	538	°C	(CARNEIRO, 2015)
Pressão na saída da turbina de alta pressão	P_{12}	300	kPa	(CARNEIRO, 2015)
Temperatura na saída do condensador	T_6	45	°C	(CARNEIRO, 2015)
Título na saída do condensador	X_6	0	-	(CARNEIRO, 2015)
Título isentrópico na saída da turbina a vapor de baixa pressão	X_{14s}	0,95	-	(CARNEIRO, 2015)

Fonte: Elaborado pela autora

**APÊNDICE B - CÁLCULOS PARA CADA COMPONENTE DO CICLO
COMBINADO A PARTIR DA 1ª LEI DA TERMODINÂMICA**

Componente	Equação	Unidade
Compressor	$W_c = \dot{m}_{ar} \times \frac{h_2 - h_1}{n_c}$	kJ/s
Câmara de combustão de gás natural	$Q_{CC,gn} = \dot{m}_{gn} \times (PCI_{gn})$ $Q_{23} = (\dot{m}_{tg} \times h_3) - (\dot{m}_{ar} \times h_2)$	kJ/s
Turbina a gás	$W_{TG} = \dot{m}_{tg} \times n_{tg} \times (h_3 - h_4)$	kJ/s
Calor oferecido pelo gás na Caldeira de recuperação	$Q_{cr} = \dot{m}_{tg} \times (h_4 - h_5)$	kJ/s
Calor recebido pelo vapor na caldeira de recuperação	$Q_{vapor} = \dot{m}_{vapor} \times (h_8 - h_7 + h_{11} - h_{10} + h_{13} - h_{12})$	kJ/s
Bomba	$W_B = \dot{m}_{vapor} \times \frac{h_7 - h_6}{n_b}$	kJ/s
Turbina a vapor de alta pressão	$W_{tv,alta} = \dot{m}_{vapor} \times n_{tv} \times (h_{11} - h_{12})$	kJ/s
Turbina a vapor de baixa pressão	$W_{tv,baixa} = \dot{m}_{vapor} \times n_{tv} \times (h_{13} - h_{14})$	kJ/s
Condensador	$Q_{cond} = \dot{m}_{vapor} \times (h_{14} - h_6)$	kJ/s
Câmara de combustão de RSU	$Q_{CC,RSU} = \dot{m}_{RSU} \times (PCI_{RSU})$ $Q_{10,8} = \dot{m}_{vapor} \times (h_{10} - h_8)$	kJ/s

Fonte: elaborado pela autora.

**APÊNDICE C - PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS ENCONTRADAS NA
SIMULAÇÃO A PARTIR DOS VALORES DE ENTRADA ADOTADOS**

Ponto	Descrição	Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg.K)
1	Entrada do ar no compressor	101,325	20	293,5	5,678
2	Saída do compressor e entrada na câmara de combustão	2.949	584	885,4	5,826
3	Saída da câmara de combustão e entrada na turbina	2.934	1255	1.670	6,5
4	Saída da turbina a gás	131	455	743,9	6,541
5	Saída da caldeira de recuperação	101	150	424,8	6,05
6	Saída do condensador e entrada na bomba	9,59	45	188,4	0,6385
7	Saída da bomba e entrada no economizador 1	10.700	46	201,9	0,647
8	Saída do economizador 1 e entrada no economizador 2	10.500	90	385	1,185
9	Incinerador	10.300	313,2	1.420	3,38
10	Saída do incinerador e entrada na CR	10.000	311	2.725	5,614
11	Saída da CR e entrada na turbina de alta pressão	9.700	538	3.474	6,736
12	Saída da turbina de alta pressão e entrada no reaquecedor (CR)	300	133,6	2.707	6,946
13	Saída do reaquecedor e entrada na turbina de baixa pressão	200	239,5	2.949	7,667
14	Saída da turbina de baixa pressão e entrada no condensador	14,59	53,41	2.530	7,81

15	Ajuste do gráfico	10.700	46	201,9	0,647
16	Saída dos gases do incinerador	101,3	200	475,8	6,162
17	Entrada da água de resfriamento	400	25	105,1	0,3668
17	Saída da água de resfriamento	150	40	167,6	0,5722

Fonte: Elaborado pela autora.

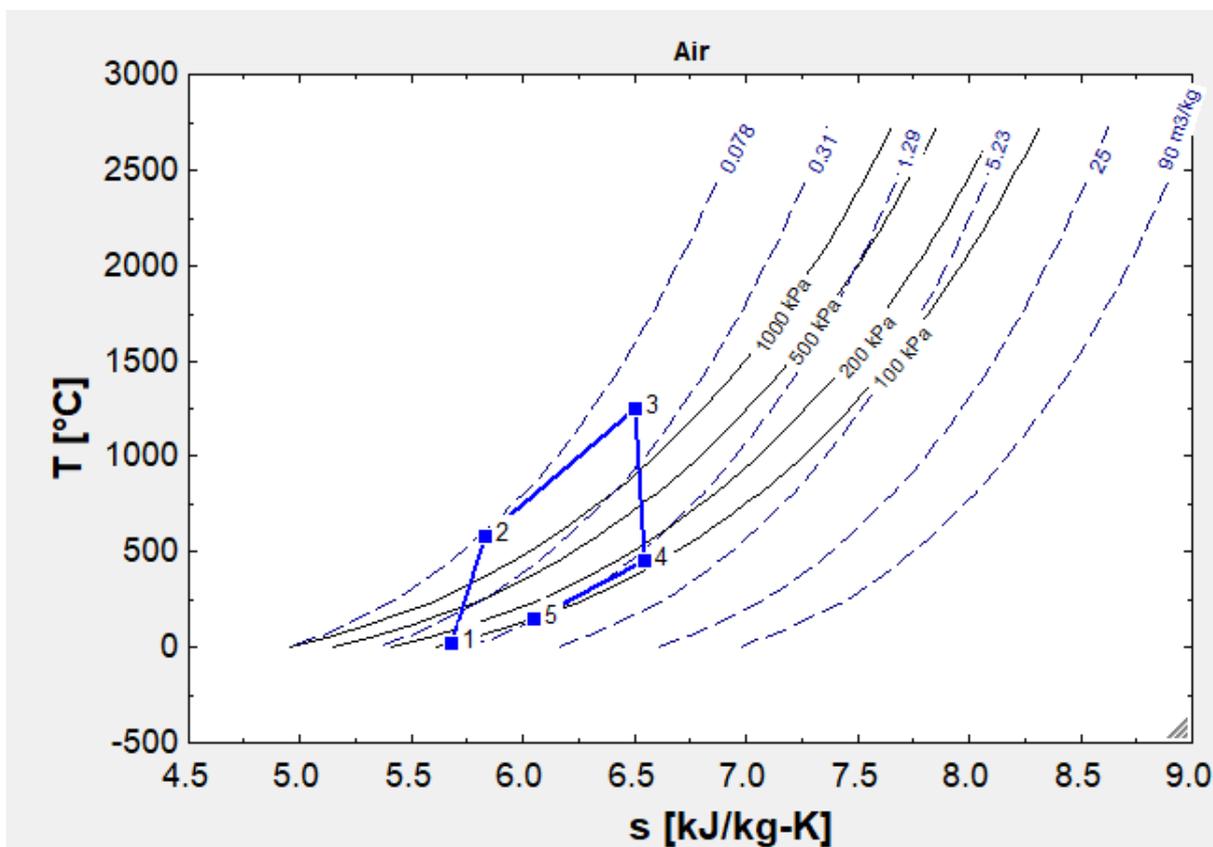
**APÊNDICE D - EQUAÇÕES DE POTÊNCIA, EFICIÊNCIA E RESULTADOS
ENCONTRADOS**

Componente	Equação	Valor	Unidade
Compressor	$W_C = \dot{m}_{ar} \times h_2 - h_1$	72.324	kJ/s
Câmara de combustão de gás natural	$Q_{CC,gn} = \dot{m}_{gn} \times (PCI_{gn})$ $Q_{23} = (\dot{m}_{tg} \times h_3) - (\dot{m}_{ar} \times h_2)$	103.081 100.119	kJ/s
Eficiência da câmara de combustão de gás natural	$n_{cc,gn} = Q_{23}/Q_{CC,gn}$	97	%
Turbina a gás	$W_{TG} = \dot{m}_{tg} \times (h_3 - h_4)$	115.324	kJ/s
Potência do ciclo a gás	$W_{eletrico,ciclo\ a\ gás} = W_{TG} - W_C$	43.000	kJ/s
Eficiência do ciclo a gás	$n_{ciclo\ a\ gás} = W_{eletrico,ciclo\ a\ gás} / Q_{23}$	43	%
Vazão mássica da água como fluido no ciclo a vapor	$\dot{m}_{vapor} = \dot{m}_{tg} \times (h_4 - h_5) / ((h_8 - h_7 + h_{11} - h_{10} + h_{13} - h_{12}))$	33,94	kg/s
Bomba	$W_B = \dot{m}_{vapor} \times h_7 - h_6$	457,1	kJ/s
Turbina a vapor de alta pressão	$W_{ta} = \dot{m}_{vapor} \times (h_{11} - h_{12})$	26.049	kJ/s
Turbina a vapor de baixa pressão	$W_{tb} = \dot{m}_{vapor} \times (h_{13} - h_{14})$	14.242	kJ/s
Condensador	$Q_{cond} = \dot{m}_{vapor} \times (h_{14} - h_6)$	79.472	kJ/s
Câmara de combustão de RSU	$Q_{CC,RSU} = \dot{m}_{RSU} \times (PCI_{RSU})$ $Q_{10,8} = \dot{m}_{vapor} \times (h_{10} - h_8)$	114.085 79.410	kJ/s

Eficiência da câmara de combustão de RSU	$n_{cc,RSU} = Q_{10,8}/Q_{CC,RSU}$	70	%
Potência do ciclo a vapor	$W_{eletrico,ciclo\ a\ vapor} = W_{ta} + W_{tb} - W_B$	39.834	kJ/s
Eficiência do ciclo a vapor	$n_{ciclo\ a\ vapor} = \frac{W_{eletrico,ciclo\ a\ vapor}}{Q_{CC,RSU} + \dot{m}_{tg} \times (h_4 - h_5)}$	26	%
Potência elétrica líquida do ciclo combinado	$W_{eletrico,ciclo\ combinado} = W_{eletrico,ciclo\ a\ gás} + W_{eletrico,ciclo\ a\ vapor}$	82,8	MJ/s
Eficiência do ciclo combinado	$n_{ciclo\ combinado} = \frac{(W_{eletrico,ciclo\ a\ gás} + W_{eletrico,ciclo\ a\ vapor})}{(Q_{CC,gñ} + Q_{CC,RSU})}$	38	%

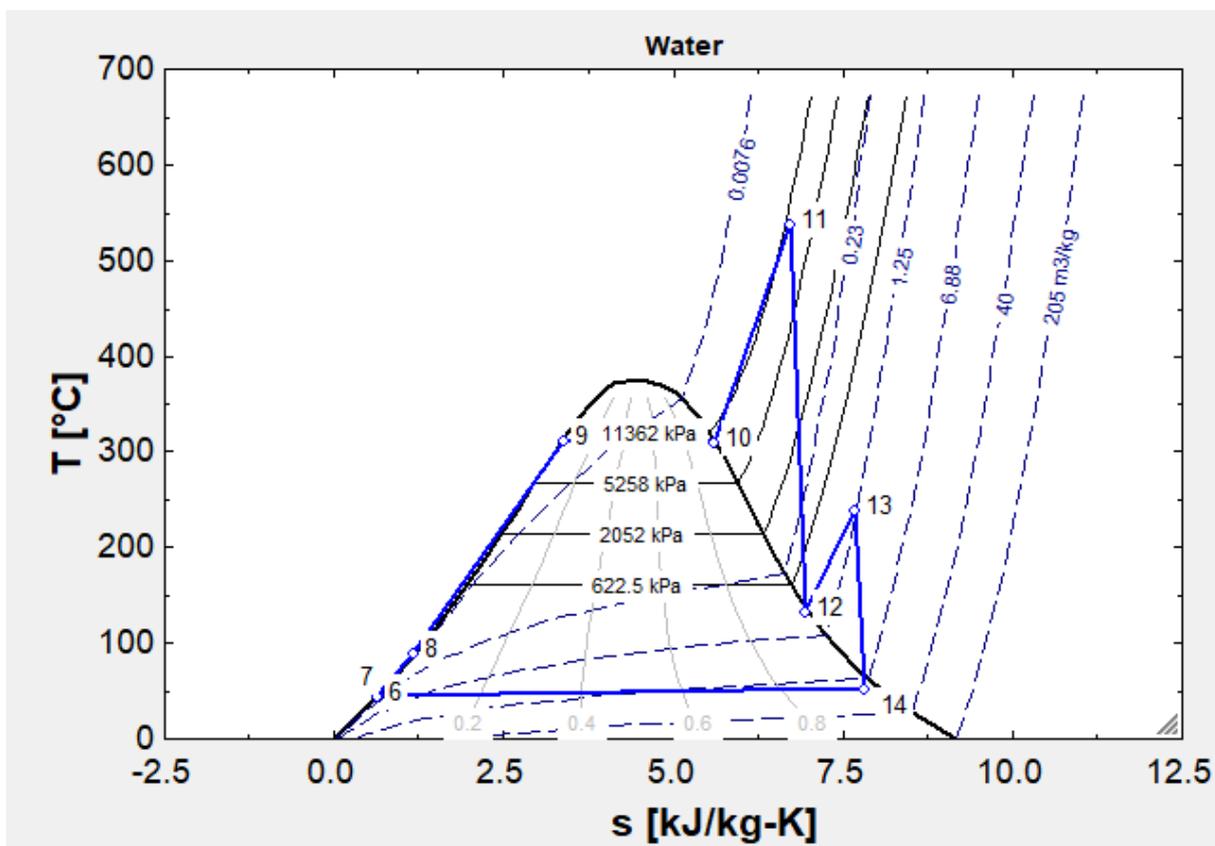
Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE E - GRÁFICO TEMPERATURA VERSUS ENTROPIA PARA O CICLO A GÁS



Fonte: Elaborado pela autora

APÊNDICE F - GRÁFICO TEMPERATURA VERSUS ENTROPIA PARA O CICLO A VAPOR



Fonte: Elaborado pela autora.

**APÊNDICE G - RESULTADOS ENCONTRADOS DA ESTEQUIOMETRIA
IDEAL**

Gases	Quantidade mássica (kg/kg_{comb})	Vazão mássica (kg/s)	Volume (Nm³/kg_{comb})	Concentração de gases (kg/Nm³)	Vazão volumétrica dos gases (Nm³/s)
CO ₂	2,202	12,24	4,324	0,123	24,04
O ₂	0,967	5,4	1,381	0,0542	7,68
N ₂	9,717	54,03	12,147	0,544	67,53
H ₂ O _{combustível}	0,648	3,6	0,522	0,036	2,90
H ₂ O _{ar}	0,126	0,7	0,101	0,007	0,5655

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE H - EQUAÇÕES DA ANÁLISE ECOLÓGICA

Parâmetro	Equação	Valor
Fator de emissão de CO ₂ equivalente para a combustão do gás natural	Média considerada da literatura (LOURENÇO, 2003; VILLELA, 2007; CARNEIRO, 2015)	3 kg/kg
Fator de emissão de CO ₂ para a combustão do RSU	$f_{CO_2}^{RSU} = 0,985 \times PCI_{RSU}/10.466$	1,93 kg/kg
Fator de emissão de SO ₂ para a combustão do RSU	$f_{SO_2} = (C_{SO_2} \times 10^{-6}) \times V_{gases}/m_{RSU}$	3,98 x 10 ⁻⁵ kg/kg
Fator de emissão de NO _x para a combustão do RSU	$f_{NO_x} = (C_{NO_x} \times 10^{-6}) \times V_{gases}/m_{RSU}$	8,36 x 10 ⁻⁵ kg/kg
Fator de emissão de particulados para a combustão do RSU	$f_{MP} = (C_{MP} \times 10^{-6}) \times V_{gases}/m_{RSU}$	7,32 x 10 ⁻⁶ kg/kg
Fator de emissão de CO ₂ equivalente para a combustão do RSU	$f_{CO_2e}^{RSU} = f_{CO_2}^{RSU} + 80 \times f_{SO_2} + 50 \times f_{NO_x} + 67 \times f_{MP}$	1,93 kg/kg
Indicador de poluição para o gás natural	$IP_{GN} = (f_{CO_2e}^{GN}/PCI_{GN}) \times 1.000$	0,08 kg/MJ
Indicador de poluição para o RSU	$IP_{RSU} = (f_{CO_2e}^{RSU}/PCI_{RSU}) \times 1.000$	0,09 kh/MJ
Indicador de poluição do sistema	$IP_{sistema} = ((f_{CO_2e}^{RSU} \times \dot{m}_{RSU}) + (f_{CO_2e}^{GN} \times \dot{m}_{gn})) / (\dot{m}_{RSU} + \dot{m}_{gn})$	0,08 kg/MJ
Eficiência ecológica do sistema	$\eta_{ecologica} = \sqrt{[0,204 \times \eta_{ciclo\ combinado} \times \frac{\ln(135 - IP)}{\eta_{ciclo\ combinado} + IP}]}$	0,909

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE I - LISTA DE SIGLAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais;

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;

EES – Engineering Equation Solver;

EPE – Empresa de Pesquisa Energética;

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente;

MEC – Ministério da Educação;

MMA – Ministério do Meio Ambiente;

MME – Ministério de Minas e Energia;

MP – Material Particulado

PCI – Poder Calorífico Inferior

PLANARES – Plano Nacional de Resíduos Sólidos;

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos;

RSU – Resíduo Sólido Urbano;

URE – Usina de Recuperação Energética;

APÊNDICE J - NOMENCLATURAS UTILIZADAS NO ARTIGO

- \dot{m}_{ar} - Vazão mássica de ar no compressor [kg/s];
- \dot{m}_{tg} - Vazão mássica de gases na turbina [kg/s];
- \dot{m}_{vapor} - Vazão mássica de vapor no ciclo a vapor [kg/s];
- \dot{m}_{gn} - Vazão mássica de gás natural na câmara de combustão [kg/s];
- \dot{m}_{RSU} - Vazão mássica de resíduos sólidos urbanos no incinerador [kg/s];
- n_{tg} - Eficiência isentrópica da turbina a gás [%];
- n_{tv} - Eficiência isentrópica da turbina a vapor [%];
- n_c - Eficiência isentrópica do compressor [%];
- n_b - Eficiência isentrópica da bomba [%];
- h - Entalpia específica (o número ao lado indica qual ponto se refere no sistema) [kJ/kg];
- W_C - Trabalho do compressor [kJ/s];
- $Q_{CC,gn}$ - Calor fornecido pelo gás natural [kJ/s];
- PCI_{gn} - Poder Calorífico Inferior do gás natural [kJ/kg];
- Q_{23} - Calor recebido pelos gases na câmara de combustão [kJ/s];
- W_{TG} - Trabalho da turbina a gás [kJ/s];
- Q_{cr} - Calor oferecido pelo gás na caldeira de recuperação [kJ/s];
- Q_{vapor} - Calor recebido pelo vapor na caldeira de recuperação [kJ/s];
- W_B - Trabalho da bomba [kJ/s];
- $W_{tv,alta}$ - Trabalho da turbina a vapor de alta pressão [kJ/s];
- $W_{tv,baixa}$ - Trabalho da turbina a vapor de baixa pressão [kJ/s];
- Q_{cond} - Calor dissipado no condensador [kJ/s];
- $Q_{CC,RSU}$ - Calor fornecido pelos resíduos sólidos urbanos na câmara de combustão de resíduos (incinerador) [kJ/s];
- Q_{10_8} - Calor recebido pelo vapor na câmara de combustão de resíduos sólidos urbanos (incinerador) [kJ/s];
- PCI_{RSU} - Poder Calorífico dos resíduos sólidos urbanos [kJ/kg];
- $\eta_{ecologica}$ - Eficiência ecológica [%];
- IP - Indicador de poluição [kg/MJ];

- $\eta_{ciclo\ combinado}$ - Eficiência do ciclo combinado [%];
- f_{CO_2e} - Fator de emissão de dióxido de carbono equivalente [kg/kg];
- f_{CO_2} - Fator de emissão de dióxido de carbono [kg/kg];
- f_{SO_2} - Fator de emissão de dióxido de enxofre [kg/kg];
- f_{NO_x} - Fator de emissão de óxidos de nitrogênio [kg/kg];
- f_{MP} - Fator de emissão de material particulado [kg/kg];
- C - Concentração do elemento [mg/Nm³];
- λ - Coeficiente de excesso de ar na combustão;
- A/C – Relação estequiométrica ar – combustível [kg_{ar}/kg_{comb}];
- T – Temperatura [°C];
- P – Pressão [kPa];
- S – Entropia específica [kJ/kg];
- V_{gases} – Vazão volumétrica dos gases de combustão [Nm³/s].

APÊNDICE K - LINHAS DE SIMULAÇÃO

```
$UnitSystem SI MASS DEG KPA °C KJ
$Keyboard US
$TABSTOPS 2 4 6 8 10 cm
```

{Ciclo a gás}

{Dados de entrada}

```
eta_c=0.80 {Eficiência do compressor}
W_net_cg=43000 [kJ/s] {Potência líquida do ciclo a gás}
HR=8630 [kJ/kWh] {Heat Rate do conjunto a gás}
Rc=29.1 {Razão de compressão P2/P1}
D_2_3=15 [kPa] {Perda de carga na caldeira de combustão}
m_dot_tg=125 [kg/s] {Vazão mássica de ar na saída da turbina oferecida pelo
fabricante}
m_dot_GN=(HR*W_net_cg)/(PCI_GN*3600) {vazão mássica de gás natural na caldeira
de combustão}
m_dot_ar=m_dot_tg-m_dot_GN {Vazão de ar que entra no compressor}
D_4_5=30 [kPa] {Perda de carga na caldeira de recuperação}
PCI_GN=36819.2 [kJ/kg] {PCI do gás natural como combustível na câmara de
combustão}
RO_GN=0.768 [kg/Nm3] {Densidade do gás natural}
Consumo_GN=m_dot_GN/RO_GN* 3600 [Nm3/h] {Consumo de gás natural na planta}
R_ar=0.2870 [kJ/kg.K] {Constante do ar}
```

{Determinação dos estados termodinâmicos}

{Ponto 1 - Entrada de ar no compressor}

```
P[1]= 101.325 [kPa]
T[1]= 20 [°C]
h[1]=Enthalpy(Air,T=T[1])
s[1]=Entropy(Air,T=T[1],P=P[1])
```

{Ponto 2 - Saída do compressor e entrada na caldeira de combustão}

```
P[2]=P[1]*29.1 [kPa]
s2_s=s[1]
h2_s=Enthalpy(Air,P=P[2],s=s2_s)
(Wc\m_s)=h2_s-h[1]
(Wc\m)=(Wc\m_s)/eta_c
h[2]=h[1]+(Wc\m)
T[2]=Temperature(Air,h=h[2])
s[2]=Entropy(Air,P=P[2],h=h[2])
```

{Ponto 3 - Saída da caldeira de combustão e entrada na turbina a gás}

```
P[3]=P[2]-15 [kPa]
h[3]=(((h[2]-h[1])*m_dot_ar)+W_net_cg)/m_dot_tg+h[4]
T[3]=Temperature(Air,h=h[3])
s[3]=Entropy(Air,P=P[3],h=h[3])
```

{Estado 4 - Saída da turbina a gás}

```
P[4]=131 [kPa]
```

T[4]=455 [°C]
 h[4]=Enthalpy(Air,T=T[4])
 s[4]=Entropy(Air,T=T[4],P=P[4])

{Estado 5 - Saída do trocador de calor e entrada na torre}

P[5]=P[4]-30 [kPa]
 T[5]=150 [°C]
 h[5]=Enthalpy(Air,T=T[5])
 s[5]=Entropy(Air,T=T[5],P=P[5])

{Estado 4s dentro CR aquecimento externo para aumento temperatura do gás-
 desconsiderada potência no cálculo}

T4_s=600
 P4_s=P[4]
 h4_s=Enthalpy(Air,T=T4_s)
 s4_s=Entropy(Air,T=T[4],P=P4_s)

{-----
 -----}

{Ciclo a vapor}

{Dados de entrada}

eta_b=0.8	{Eficiência isentrópica da bomba}
eta_tv=0.9	{Eficiência isentrópica da turbina a vapor}
DP_7_8=200 [kPa]	{Perda de carga no economizador 1}
DP_8_9=200 [kPa]	{Perda de carga no economizador 2}
DP_9_10=300	{Perda no evaporador}
DP_10_11=300 [kPa]	{Perda de carga no economizador 2}
DP_12_13=100	
DP_cond=5 [kPa]	{Perda de carga no condensador}
DP_IN=200 [kPa]	{Perda de carga no incinerador}
PCI_rsu=20535.36 [kJ/kg]	{Poder calorífico inferior dos plásticos}
m_dot_RSU=20/3.6 [kg/s]	{Vazão mássica de rsu no incinerador}

{Determinação dos estados termodinâmicos}

{Estado 6 - saída do condensador e entrada na bomba}

T[6]=45 [°C]
 X[6]=0
 h[6]=Enthalpy(Water,T=T[6],x=x[6])
 s[6]=Entropy(Water,T=T[6],x=x[6])
 P[6]=Pressure(Water,T=T[6],x=x[6])

{Estado 7 - saída da bomba e entrada na caldeira de recuperação}

P[7]=P[10]+300+200+200 [kPa]
 s7_s=s[6]
 h7_s=Enthalpy(Water,P=P[7],s=s7_s)
 (Wb\m_s)=(h7_s-h[6])
 (Wb\m)=(Wb\m_s)/eta_b
 h[7]=(Wb\m)+h[6]
 T[7]=Temperature(Water,P=P[7],h=h[7])
 s[7]=Entropy(Water,T=T[7],P=P[7])

{Estado 8 - saída da caldeira de recuperação e entrada no incinerador}

$T[8]=90$ [°C]
 $P[8]=P[10]+300+200$ [kPa]
 $h[8]=\text{Enthalpy}(\text{Water}, P=P[8], T=T[8])$
 $s[8]=\text{Entropy}(\text{Water}, P=P[8], T=T[8])$

{Estado 9 - dentro do incinerador}

$P[9]=P[10]+300$ [kPa]
 $X[9]=0$
 $T[9]=\text{Temperature}(\text{Water}, P=P[9], X=X[9])$
 $s[9]=\text{Entropy}(\text{Water}, X=X[9], P=P[9])$
 $h[9]=\text{Enthalpy}(\text{Water}, X=X[9], P=P[9])$

{Estado 10 - saída do incinerador e entrada na caldeira de recuperação}

$X[10]=1$
 $P[10]=10000$ [kPa]
 $T[10]=\text{Temperature}(\text{Water}, P=P[10], X=X[10])$
 $h[10]=\text{Enthalpy}(\text{Water}, P=P[10], X=X[10])$
 $s[10]=\text{Entropy}(\text{Water}, P=P[10], X=X[10])$

{Estado 11 - saída da caldeira de recuperação e entrada na turbina de alta pressão}

$P[11]=P[10]-300$ [kPa]
 $T[11]=538$ [°C]
 $s[11]=\text{Entropy}(\text{Water}, T=T[11], P=P[11])$
 $X[11]=\text{Quality}(\text{Water}, T=T[11], P=P[11])$
 $h[11]=\text{Enthalpy}(\text{Water}, T=T[11], P=P[11])$

{Estado 12 - saída da turbina de alta pressão e entrada no recuperador de calor}

$s_{12_s}=s[11]$
 $P[12]=300$ [kPa]
 $X_{12_s}=\text{Quality}(\text{Water}, s=s_{12_s}, P=P[12])$
 $h_{12_s}=\text{Enthalpy}(\text{Water}, P=P[12], s=s_{12_s})$
 $(W_{tv_alta_m_s})=h[11]-h_{12_s}$
 $(W_{tv_alta_m})=(W_{tv_alta_m_s}) \cdot \eta_{tv}$
 $h[12]=h[11]-(W_{tv_alta_m})$
 $s[12]=\text{Entropy}(\text{Water}, h=h[12], P=P[12])$
 $X[12]=\text{Quality}(\text{Water}, h=h[12], P=P[12])$
 $T[12]=\text{Temperature}(\text{Water}, h=h[12], P=P[12])$

{Estado 13 - saída do recuperador de calor e entrada na turbina de baixa pressão}

$P[13]=P[12]-100$
 $s[13]=s_{14_s}$
 $T[13]=\text{Temperature}(\text{Water}, P=P[13], s=s[13])$
 $h[13]=\text{Enthalpy}(\text{Water}, T=T[13], P=P[13])$

{Estado 14 - saída da turbina de baixa pressão e entrada no condensador}

$T_{14_s}=45$ [°C]
 $P[14]=P[6]+5$ [kPa]
 $X_{14_s}=X_{12_s}$
 $h_{14_s}=\text{Enthalpy}(\text{Water}, P=P[14], X=X_{14_s})$
 $s_{14_s}=\text{Entropy}(\text{Water}, P=P[14], X=X_{14_s})$
 $(W_{tv_baixa_m_s})=h[13]-h_{14_s}$
 $(W_{tv_baixa_m})=(W_{tv_baixa_m_s}) \cdot \eta_{tv}$
 $h[14]=h[13]-(W_{tv_baixa_m})$

$s[14]=\text{Entropy}(\text{Water},h=h[14],P=P[14])$
 $X[14]=\text{Quality}(\text{Water},h=h[14],P=P[14])$
 $T[14]=\text{Temperature}(\text{Water},h=h[14],P=P[14])$

{Estado 15 - para ajuste do gráfico}

$P[15]=P[7]$
 $T[15]=T[7]$
 $s[15]=s[7]$

{Estado 16 - saída dos gases do incinerador}

$P[16]=101.325$ [kPa]
 $T[16]=200$ [°C]
 $h[16]=\text{Enthalpy}(\text{Air},T=T[16])$
 $s[16]=\text{Entropy}(\text{Air},T=T[16],P=P[16])$

{Estado 17 - Água de resfriamento do condensador - entrada}

$T[17]=25$ [°C]
 $P[17]=400$ [kPa]
 $h[17]=\text{Enthalpy}(\text{Water},T=T[17],P=P[17])$
 $s[17]=\text{Entropy}(\text{Water},T=T[17],P=P[17])$

{Estado 18 - Água de resfriamento do condensador - saída}

$T[18]=40$ [°C]
 $P[18]=150$ [kPa]
 $h[18]=\text{Enthalpy}(\text{Water},T=T[18],P=P[18])$
 $s[18]=\text{Entropy}(\text{Water},T=T[18],P=P[18])$

{-----}

{Cálculos - Análise Energética}

{Ciclo a gás}

{Razão entre a massa de ar e de GN na câmara de combustão}

$R_{cc}=m_{\dot{ar}}/m_{\dot{GN}}$

{Compressor}

$W_c=m_{\dot{ar}}*(h[2]-h[1])$ {Potência do compressor}

{Câmara de combustão}

$Q_{cc_gn}=m_{\dot{GN}}*PCI_{GN}$ {Calor fornecido pelo gás natural na cc}

$Q_{23}=(h[3]*m_{\dot{tg}})-(h[2]*m_{\dot{ar}})$ {Calor recebido pelo fluido na cc}

$\eta_{cc_gn}=(Q_{23})/(Q_{cc_gn})$ {Eficiência da cc}

{Turbina a gás}

$W_{tg}=m_{\dot{tg}}*(h[3]-h[4])$ {Trabalho líquido da turbina a gás}

{Potência elétrica do ciclo a gás}

$W_{eletrica_gas} = W_{tg} - W_c$	{Trabalho líquido do ciclo a gás}
{Eficiências térmicas do ciclo a gás}	
$\eta_{ciclo_gas} = (W_{tg} - W_c) / (Q_{23})$	{Eficiência térmica do ciclo a gás}
{Caldeira de recuperação - Trocador de calor}	
$\{m_{dot_tg} * (h[4] - h[5]) * \eta_{cc} = m_{dot_vapor} * ((h[8] - h[7]) + (h[12] - h[10]) + (h[13] - h[12]))\}$	{Balanço de energia na CR}
$m_{dot_vapor} = (m_{dot_tg} * (h[4] - h[5])) / ((h[8] - h[7]) + (h[11] - h[10]) + (h[13] - h[12]))$	{Balanço de energia na caldeira de recuperação para descobrir a vazão mássica de vapor}
$y = m_{dot_vapor} / m_{dot_tg}$	{Relação
entre massa vapor/água no ciclo Rankine e ciclo Brayton}	
$Q_{vapor_cr} = m_{dot_vapor} * (h[8] - h[7]) + (h[11] - h[10]) + (h[13] - h[12])$	{Calor
fornecido ao vapor na caldeira de recuperação}	
{Ciclo a vapor}	
{Incinerador}	
$Q_{cc_rsu} = PCI_{rsu} * m_{dot_RSU}$	{Potência
térmica do RSU no incinerador}	
$Q_{10_8} = m_{dot_vapor} * (h[10] - h[8])$	{Potência térmica recebida
pelo vapor no incinerador}	
$\eta_{incinerador} = Q_{10_8} / Q_{cc_rsu}$	{Eficiência do incinerador}
{ $\eta_{incinerador} = m_{dot_vapor} * (h[10] - h[8]) / PCI_{rsu} * m_{dot_RSU}$ }	{Para trabalhos futuros
analisar por PCI de diferentes resíduos}	
{Bomba}	
$W_b = m_{dot_vapor} * (h[7] - h[6])$	{Trabalho líquido da
bomba}	
{Turbinas a vapor}	
$W_{ta} = m_{dot_vapor} * (h[11] - h[12])$	{Trabalho líquido da turbina
de alta pressão}	
$W_{tb} = m_{dot_vapor} * (h[13] - h[14])$	{Trabalho líquido da turbina
de baixa pressão}	
{Condensador}	
$m_{dot_agua} = (m_{dot_vapor} * (h[14] - h[6])) / (h[18] - h[17])$	{Balanço de
energia no condensador considerando água de resfriamento a 25°C para descobrir vazão da água de resfriamento}	
$Q_{cond} = m_{dot_vapor} * (h[14] - h[6])$	{Calor que
sai no condensador}	
{Trabalho líquido do ciclo a vapor}	

$$W_{\text{elétrica_vapor}} = W_{\text{ta}} + W_{\text{tb}} - W_{\text{b}}$$

{Eficiência do ciclo a vapor}

$$\eta_{\text{ciclo_vapor}} = W_{\text{elétrica_vapor}} / (Q_{\text{cc_rsu}} + (m_{\text{dot_tg}} * (h_{[4]} - h_{[5]})))$$

{Ciclo combinado}

{Potência elétrica do ciclo combinado}

$$W_{\text{elétrica_ciclo_combinado}} = W_{\text{elétrica_gas}} + W_{\text{elétrica_vapor}}$$

{Eficiência do ciclo combinado}

$$\eta_{\text{ciclo_combinado}} = (W_{\text{elétrica_ciclo_combinado}}) / (Q_{\text{cc_rsu}} + Q_{\text{cc_gn}})$$

{Potência elétrica do ciclo combinado anual}

$$W_{\text{elétrica_ciclo_combinado_anual}} = W_{\text{elétrica_ciclo_combinado}} * 8270$$

APÊNDICE L – POPULAÇÃO DE PORTO ALEGRE E MUNICÍPIOS LIMÍTROFES

Município	Quantidade de habitantes	Fonte
Porto Alegre	1.409.351	IBGE - 2010
Alvorada	195.673	IBGE - 2010
Cachoeirinha	118.278	IBGE – 2010
Canoas	323.827	IBGE – 2010
Eldorado do Sul	34.343	IBGE – 2010
Nova Santa Rita	22.716	IBGE – 2010
Triunfo	25.793	IBGE – 2010
Viamão	239.384	IBGE – 2010

Fonte: Elaborado pela autora.