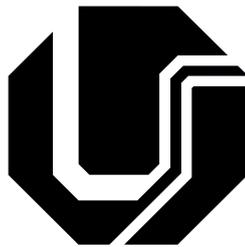


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA - FEMEC
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CLÁUDIO FERREIRA DOS SANTOS JÚNIOR
EVANDRO EVANGELISTA SANTOS**

**GASEIFICAÇÃO EM LEITO FIXO DE AMOSTRAS DE CIGARROS
APREENDIDOS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL
DE UBERLÂNDIA**

**UBERLÂNDIA
2023**

**CLÁUDIO FERREIRA DOS SANTOS JÚNIOR
EVANDRO EVANGELISTA SANTOS**

**GASEIFICAÇÃO EM LEITO FIXO DE AMOSTRAS DE CIGARROS
APREENDIDOS**

Trabalho de Fim de Curso, apresentado como exigência parcial para obtenção de grau de bacharel em Engenharia Mecânica, à Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho.

Co-orientador: Dr. Cassius Ricardo Nascimento Ferreira.

**UBERLÂNDIA
2023**

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus por sempre ter nos mantido no caminho correto através de Sua graça.

Agradecemos à Universidade Federal de Uberlândia, especialmente à Faculdade de Engenharia Mecânica, pela oportunidade de realizar este curso.

Ao nosso professor orientador, Solidônio Rodrigues de Carvalho, pela orientação e por nos disponibilizar os equipamentos e amostras para realização dos experimentos necessários.

Ao aluno de mestrado, Moisés, e ao aluno de doutorado, Eduardo, que nos ajudaram e nos auxiliaram na geração do gás de síntese e também nas análises cromatográficas.

Eu, Cláudio, agradeço aos meus pais Cláudio Ferreira e Eliane Luzia pelo apoio e incentivo por toda vida. Agradeço à minha esposa Isabelle Rodrigues por permanecer ao meu lado neste percurso acadêmico. Agradeço ao meu irmão Albert Douglas que inspirou a graduação e a minhas irmãs que sempre acreditaram neste momento. Agradeço ao meu amigo Dr. Nivaldo Maciel que viabilizou esta experiência.

Eu, Evandro, agradeço ao meu pai, José de Fátima, à minha mãe, Elizi Anne, e à minha prima, Vanita, por todo apoio, suporte e incentivo prestados durante o período da minha graduação e em todos os outros momentos da minha vida.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Percentual de Fumantes - Variação Temporal (Fonte: Vigitel Brasil 2006 a 2021: Vigilância de Fatores de Risco e Proteção para Doenças Crônicas por Inquérito Telefônico, Adaptado).....	17
Figura 2: Volume de Cigarros Consumidos - Variação Temporal (Fonte: Vigitel 2017 e Estimativa de Consumo de Cigarros Ilícitos no Brasil, Adaptado).....	18
Figura 3: Quantidade de Cigarros Destruídos (R\$) - Variação Temporal (Fonte: Receita Federal, Adaptado).....	21
Figura 4: a) Ciclo Rankine (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018); b) Diagrama T-s Ciclo Rankine (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).....	30
Figura 5: Ciclo Rankine Com Reaquecimento (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018); b) Diagrama T-s Ciclo Rankine Com Reaquecimento Borgnakke e Sonntag, 2018).....	31
Figura 6: Ciclo Rankine Regenerativo Com Aquecedor de Mistura (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018); b) Diagrama TS Ciclo Rankine Regenerativo Com Aquecedor de Mistura (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).....	32
Figura 7: Aquecedor de Superfície (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).....	33
Figura 8: Ciclo Brayton (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018); b) Diagrama T-s Ciclo Brayton (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).....	35
Figura 9: Ciclo Brayton Com Regeneração (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018); b)Ciclo Brayton Com Regeneração (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).....	36
Figura 10: Diagramas P-v e T-s do Ciclo Otto (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).....	37
Figura 11: Ciclo Combinado Brayton/Rankine (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).....	39
Figura 12: Pacote de Cigarros.....	42

Figura 13: a) Pacote de Cigarros Triturado; b) Sobras de Cigarros Triturado.....	43
Figura 14: Reator de Gaseificação.....	43
Figura 15: Bomba de Vácuo.....	44
Figura 16: a) Sistema de Filtragem; b)Recipientes Com Sílica.....	45
Figura 17: Bags de Amostragem Com Syngas.....	45
Figura 18: Cinzas Restantes da Gaseificação.....	46
Figura 19: Analisador TGA 2000A.....	47
Figura 20: Curva de Degradação da Amostra.....	48
Figura 21: Balança de Precisão.....	49
Figura 22: Recipiente Para Análise Calorimétrica.....	49
Figura 23: Equipamento Para Pressurização.....	49
Figura 24: Calorímetro.....	49
Figura 25: Comparação Entre PC's (Fonte: Jenkins, 1990; Adaptado).....	50
Figura 26: Cromatógrafo Gasoso.....	51
Figura 27: a) Remoção da Amostra de Syngas Coletada a 670 °C; b) Injeção da Amostra de Syngas Coletada a 670 °C.....	52
Figura 28: a) Remoção da Amostra de Syngas Coletada a 800 °C; b) Injeção da Amostra de Syngas Coletada a 800 °C.....	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Aumento do Risco de Enfermidades Devido Ao Tabagismo (Fonte: Instituto Nacional de Câncer).....	16
Quadro 2: Participação do Mercado Ilegal.....	18
Quadro 3: Apreensões de Cigarros Em R\$ - Variação Temporal (Fonte: Nota Técnica Unafisco N° 25/2022).....	19
Quadro 4: Maços de Cigarros Apreendidos - Variação Temporal.....	20
Quadro 5: Análise Imediata de Amostras Padrão.....	48
Quadro 6: Poderes Caloríficos das Amostras Úmidas e Secas.....	50
Quadro 7: Composição Química das Amostras de Gás de Síntese.....	53
Quadro 8: Entalpia de Formação dos Compostos Presentes no Gás de Síntese (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018; Çengel e Boles, 2013; Cheméo, 2023; NIST, 2023).....	54
Quadro 9: Entalpia de Combustão, Massa Molar e PCI das Amostras.....	56
Quadro 10: Propriedades Termodinâmicas - Ciclo Rankine.....	59
Quadro 11: Variáveis - Ciclo Rankine.....	60
Quadro 12: Propriedades Termodinâmicas - Ciclo Rankine Regenerativo Com Aquecedor de Mistura.....	61
Quadro 13: Variáveis - Ciclo Rankine.....	62
Quadro 14: Propriedades Termodinâmicas - Ciclo Brayton.....	63
Quadro 15: Variáveis - Ciclo Brayton.....	64
Quadro 16: Propriedades Termodinâmicas - Ciclo Brayton Com Regeneração.....	65

Quadro 17: Variáveis - Ciclo Brayton Com Regeneração.....	66
Quadro 18: Propriedades Termodinâmicas - Parte Brayton do Ciclo Combinado Brayton/Rankine.....	67
Quadro 19: Variáveis - Parte Brayton do Ciclo Combinado Brayton/Rankine.....	68
Quadro 20: Propriedades Termodinâmicas - Parte Rankine do Ciclo Combinado Brayton/Rankine.....	68
Quadro 21: Variáveis - Parte Rankine do Ciclo Combinado Brayton/Rankine.....	69
Quadro 22: Propriedades Termodinâmicas - Ciclo Combinado Otto.....	72
Quadro 23: Variáveis - Ciclo Otto.....	73

SÍMBOLOS E ABREVIações

Eq.: Equação

Eqs.: Equações

INCA: Instituto Nacional de Câncer

FNCP: Fórum Nacional Contra a Pirataria e a Ilegalidade

CO_2 : Dióxido de Carbono

H_2O : Água Líquida ou Gasosa

C : Carbono

O_2 : Gás Oxigênio

H_2 : Gás Hidrogênio

CO : Monóxido de Carbono

CH_4 : Gás Metano

h_R : Entalpia de Reação

H_{prod} : Entalpia dos Produtos

H_{reag} : Entalpia dos Reagentes

h_c : Entalpia de Combustão

\bar{h}_f : Entalpia de Formação

\bar{h}_f^o : Entalpia de Formação no Estado de Referência Padrão

PCI: Poder Calorífico Inferior

PCS: Poder Calorífico Superior

PCI_{BS} : Poder Calorífico Inferior em Base Seca

PCS_{BS} : Poder Calorífico Superior em Base Seca

h_{lv} : Entalpia de Vaporização da Água

m : Massa de Vapor

H : Massa de Hidrogênio Contida no Combustível

PCI_{BU} : Poder Calorífico Inferior em Base Úmida

TU : Porcentagem em Massa de Umidade da Amostra

\dot{m}_e : Vazão Mássica na Entrada

\dot{m}_s : Vazão Mássica na Saída

$\dot{Q}_{V.C.}$: Calor que Entra ou Sai no Volume de Controle

$\dot{W}_{V.C.}$: Trabalho que Entra ou Sai no Volume de Controle

T-s: Temperatura Versus Entropia

P-v: Pressão Versus Volume Específico

$\eta_{térmico}$: Rendimento Térmico

\dot{W}_{ciclo} : Trabalho Líquido Gerado Pelo Ciclo

\dot{Q}_H : Transferência de Calor ao Fluido

y : Máxima Fração de Extração de Vapor ou Estado Termodinâmico do Ciclo Brayton Com Regeneração

k : Razão Entre os Calores Específicos a Pressão e Volume Constantes do Ar

r_v : Relação de Compressão

$V_{máx}$: Volume Máximo do Cilindro do Motor

$V_{mín}$: Volume Mínimo do Cilindro do Motor

$\eta_{turbina}$: Eficiência Isentrópica de Turbina

$\eta_{bomba/compressor}$: Eficiência Isentrópica de Bomba ou Compressor

PC: Poder Calorífico

$PCS_{Cigarro Triturado}$: Poder Calorífico Superior do Cigarro Triturado

$PCS_{Combustível Sólido}$: Poder Calorífico Superior de Um Determinado Combustível Sólido

C_2H_4 : Eteno

C_2H_6 : Etano

C_3H_4 : Propadieno ou Propino

C_3H_6 : Propeno

C_3H_8 : Propano

N_2 : Gás Nitrogênio

N_p : Número de Mols do Produto

N_r : Número de Mols do Reagente

AC : Relação Ar/Combustível

m_{ar} : Massa de Ar

m_{comb} : Massa de Combustível

$\eta_{caldeira/combustão}$: Eficiência Térmica de Caldeira ou Câmara de Combustão

\dot{m}_{comb} : Vazão de Combustível

PCI_{syngas} : Poder Calorífico do Gás de Síntese

E_{Prod} : Energia Mecânica Produzida por Quilograma de Syngas Requerido

\dot{Q}_L : Calor Retirado do Fluido de Trabalho

P_i : Pressão em Um Estado Termodinâmico

T_i : Temperatura em Um Estado Termodinâmico

x_i : Título em Um Estado Termodinâmico

h_i : Entalpia em Um Estado Termodinâmico

s_i : Entropia em Um Estado Termodinâmico

h_{i_s} : Entalpia Ideal em Um Estado Termodinâmico

s_{i_s} : Entropia Ideal em Um Estado Termodinâmico

\dot{W}_B : Trabalho Requerido Pela Bomba

\dot{W}_T : Trabalho Gerado Pela Turbina

\dot{W}_{B1} : Trabalho Requerido Pela Bomba 1

\dot{W}_{B2} : Trabalho Requerido Pela Bomba 2

v_i : Volume Específico em Um Estado Termodinâmico

\dot{W}_C : Trabalho Requerido Pelo Compressor

$\eta_{regenerador}$: Eficiência do Regenerador

x : Estado Termodinâmico do Ciclo Brayton Com Regeneração

η_{motor} : Eficiência do Motor

$\dot{W}_{elétrica}$: Potência Elétrica Gerada Pelo Motor

\dot{W}_{total} : Trabalho de Eixo Gerado Por Todos os Cilindros do Motor

V_d : Volume Deslocado em Um Cilindro

$A_{cilindro}$: Área do Pistão de Cada Cilindro

$s_{pistão}$: Curso do Pistão

V_t : Volume Total do Motor

PME : Pressão Média Efetiva do Motor

n : Rotação do Motor

u_e : Energia Interna de Entrada

u_s : Energia Interna de Saída

N : Número de Cilindros do Motor

DOS SANTOS JR, Cláudio Ferreira; SANTOS, Evandro Evangelista. **Gaseificação em leito fixo de amostras de cigarros apreendidos**. 2023. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, 2023.

RESUMO

O volume de materiais apreendidos tem aumentado ao longo dos anos e por sua vez o descarte adequado destes materiais tem sido um desafio tanto ao cuidado ambiental quanto ao retorno econômico ao Estado nessas apreensões. O presente trabalho objetiva utilizar um gás de síntese gerado a partir de cigarros apreendidos como combustível na geração de energia elétrica. Esta análise foi realizada utilizando os equipamentos do Laboratório de Transferência de Calor e Massa da Universidade Federal de Uberlândia, no qual amostras de cigarros foram submetidas a testes de calorimetria, análise termogravimétrica, gaseificação e cromatografia do material bruto e gases derivados das amostras. Foi possível identificar propriedades importantes como poder calorífico, teor de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo do material. Além disso, foi analisada a composição química do gás derivado bem como seu potencial energético atrelado a diferentes ciclos de potência. Os resultados mostraram que os gases de síntese coletados a 670 °C e 800 °C possuem um poder calorífico inferior igual a 2371 kJ/kg e 77,59 kJ/kg, respectivamente. O ciclo de potência Otto, usando o syngas coletado a 670 °C, apresentou a maior eficiência (60,44 %) enquanto que o ciclo combinado Brayton/Rankine apresentou a maior razão de energia mecânica produzida por quilograma de syngas requerido (2134 kJ/kg).

Palavras-chave: gás de síntese, cigarros, combustível, calorimetria, análise termogravimétrica, gaseificação, cromatografia, ciclos de potência, poder calorífico inferior e eficiência.

DOS SANTOS JR, Cláudio Ferreira; SANTOS, Evandro Evangelista. **Gasification in fixed bed of seized cigarettes samples**. 2023. 78 p. Final paper (Degree in Mechanical Engineering) - Federal University of Uberlândia, 2023.

ABSTRACT

The volume of seized materials has increased over the years and the proper disposal of these materials has been a challenge to environmental preservation as to the economic return to the State in these seizures. The present work aims to use a synthesis gas generated from seized cigarettes as fuel in the generation of electric energy. This analysis was performed using the equipment from the Laboratory of Heat and Mass Transfer at the Federal University of Uberlândia, which cigarette samples were submitted to calorimetry tests, thermogravimetric analysis, gasification and chromatography of the raw material and gases derived from the samples. It was possible to identify important properties such as calorific value, moisture content, volatile materials, ash and fixed carbon of the material. In addition, the chemical composition of the derived gas was analyzed as well as its energy potential linked to different power cycles. The results showed that the synthesis gases collected at 670 °C and 800 °C have a lower calorific value equal to 2371 kJ/kg and 77.59 kJ/kg, respectively. The Otto power cycle, using syngas collected at 670 °C, showed the highest efficiency (60.44 %) while the combined Brayton/Rankine cycle showed the highest ratio of mechanical energy produced per kilogram of syngas required (2134 kJ/ kg).

Keywords: synthesis gas, cigarettes, fuel, calorimetry, thermogravimetric analysis, gasification, chromatography, power cycles, lower calorific value and efficiency.

SUMÁRIO

1) INTRODUÇÃO	16
1.1) MERCADOS LEGAL E ILEGAL DE CIGARROS	16
1.2) DESTINAÇÃO DOS CIGARROS ILEGAIS	21
1.3) OBJETIVOS	22
2) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1) GASEIFICAÇÃO	22
2.2) PODER CALORÍFICO	25
2.2.1) ENTALPIA DE COMBUSTÃO E ENTALPIA DE FORMAÇÃO	25
2.2.2) PODER CALORÍFICO SUPERIOR E PODER CALORÍFICO INFERIOR	26
2.2.3) DETERMINAÇÃO DO PCS E PCI	27
2.3) EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE E PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA EM REGIMÉ PERMANENTE	28
2.4) CICLOS DE POTÊNCIA	29
2.4.1) CICLO RANKINE	30
2.4.2) CICLO RANKINE COM REAQUECIMENTO	31
2.4.3) CICLO RANKINE REGENERATIVO	32
2.4.3.1) CICLO RANKINE REGENERATIVO COM AQUECEDOR DE MISTURA	32
2.4.3.2) CICLO RANKINE REGENERATIVO COM AQUECEDOR DE SUPERFÍCIE	34
2.4.4) CICLO BRAYTON	35
2.4.5) CICLO BRAYTON COM REGENERAÇÃO	36
2.4.6) CICLO OTTO	37
2.4.7) CICLO COMBINADO BRAYTON/RANKINE	39
2.4.8) EFICIÊNCIAS ISENTRÓPICAS	40
2.5) TERMOGRAVIMETRIA	41
2.6) CALORIMETRIA	41
2.7) CROMATOGRAFIA	42
3) METODOLOGIA E RESULTADOS	42
3.1) GERAÇÃO DO SYNGAS	42
3.2) ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	47
3.3) ANÁLISE CALORIMÉTRICA	49
3.4) ANÁLISE CROMATOGRÁFICA	52
3.6) DETERMINAÇÃO DO PCI DO SYNGAS	55
3.7) DESEMPENHO DO SYNGAS EM DIFERENTES CICLOS DE POTÊNCIA	59
3.7.1) CICLO RANKINE	60
3.7.2) CICLO RANKINE REGENERATIVO COM AQUECEDOR DE MISTURA	62

3.7.3) CICLO BRAYTON	64
3.7.4) CICLO BRAYTON COM REGENERAÇÃO	66
3.7.5) CICLO COMBINADO BRAYTON/RANKINE	68
3.7.6) CICLO OTTO	71
4) CONCLUSÃO	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

1) INTRODUÇÃO

1.1) MERCADOS LEGAL E ILEGAL DE CIGARROS

Segundo o Instituto Nacional de Câncer (INCA, 2022), o tabagismo é reconhecido como uma doença crônica advinda da dependência à nicotina presente nos produtos à base de tabaco, dentre os quais encontra-se o cigarro. A exposição à fumaça do tabaco, de forma ativa ou passiva, está relacionada a diversas doenças como, por exemplo, vários tipos de câncer (leucemia mieloide aguda, câncer de bexiga, câncer de pâncreas, câncer de fígado, câncer do colo do útero, câncer de esôfago, câncer nos rins, câncer de laringe, câncer de pulmão, câncer na cavidade oral, câncer de faringe e câncer de estômago), doenças do aparelho respiratório (enfisema pulmonar, bronquite crônica, asma e infecções respiratórias), doenças cardiovasculares (angina, infarto agudo do miocárdio, hipertensão arterial, aneurismas, acidente vascular cerebral e trombooses), úlcera do aparelho digestivo, osteoporose, catarata e patologias buco-dentais. Além disso, a exposição à fumaça do tabaco também gera impotência sexual, no homem, e infertilidade, menopausa precoce e complicações na gravidez, na mulher.

Quadro 1: Aumento do Risco de Enfermidades Devido Ao Tabagismo (Fonte: Instituto Nacional de Câncer).

Enfermidade	Aumento do Risco
Doença coronariana	2 a 4 vezes
Acidente vascular cerebral	2 a 4 vezes
Câncer de pulmão (no homem)	23 vezes
Câncer de pulmão (na Mulher)	13 vezes
Morte devido a doenças pulmonares obstrutivas crônicas	12 a 13 vezes

Ainda segundo o INCA (2022), o tabagismo e a exposição de forma passiva à fumaça do tabaco são responsáveis por 428 mortes diárias e, aproximadamente,

156 mil óbitos anuais no Brasil. No Quadro 1, é possível ver o quanto o tabagismo pode aumentar o risco de surgimento de várias enfermidades.

Devido aos vários malefícios decorrentes do tabagismo, o Brasil implementou um amplo conjunto de intervenções legislativas, regulatórias, educacionais e econômicas, desde 1986, com o principal objetivo de reduzir o consumo desses produtos tornando-se líder mundial no controle do tabaco e um dos países mais bem sucedidos na redução do uso do tabaco (INCA, 2022). Dentre essas intervenções podemos citar: a proibição de propagandas nos meios de comunicação (televisão, revistas, jornais, mídias sociais e outros), a introdução de advertências nas embalagens de cigarros, aumento da carga tributária sobre o produto e também o estabelecimento de um preço mínimo de venda (MONARCHA, 2019). As medidas adotadas pelo Brasil fizeram com que o percentual total de fumantes caísse significativamente nos últimos anos, conforme podemos ver no gráfico abaixo:

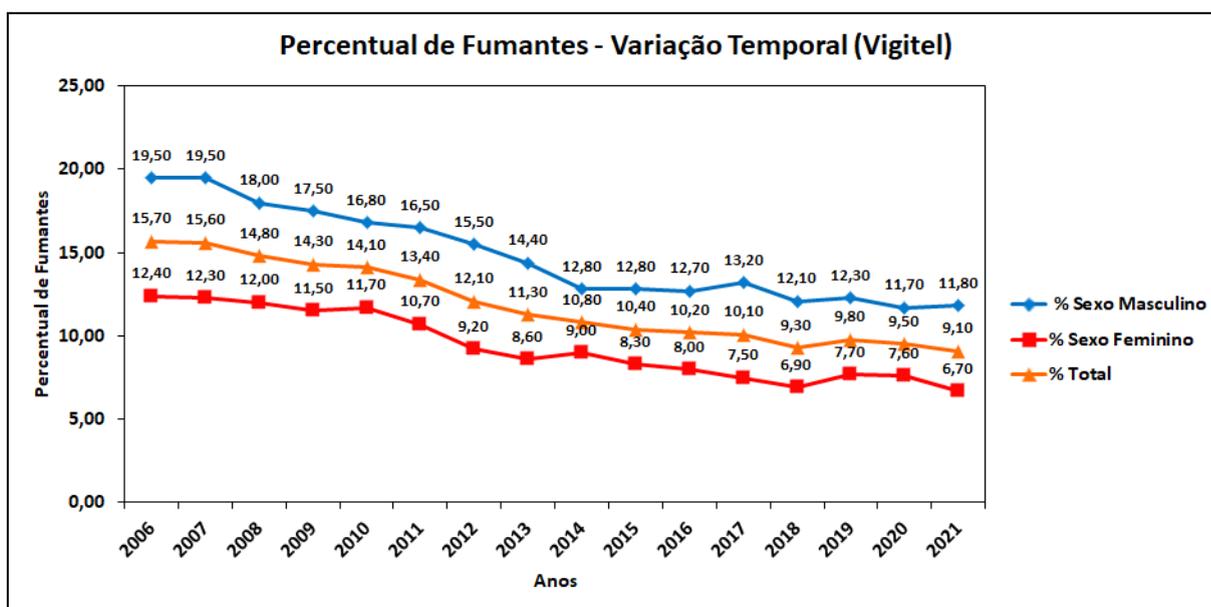


Figura 1: Percentual de Fumantes - Variação Temporal (Fonte: Vigitel Brasil 2006 a 2021: Vigilância de Fatores de Risco e Proteção para Doenças Crônicas por Inquérito Telefônico, Adaptado).

Entretanto, tais intervenções, sobretudo o aumento da carga tributária e o preço mínimo de venda, trouxeram como consequência o estímulo ao crescimento do mercado ilegal de cigarros que acaba praticando preços mais competitivos do que os do mercado legal (MONARCHA, 2019). A variação temporal do volume de

cigarros consumidos, em bilhões de unidades, provenientes dos mercados legal e ilegal pode ser vista no gráfico a seguir:

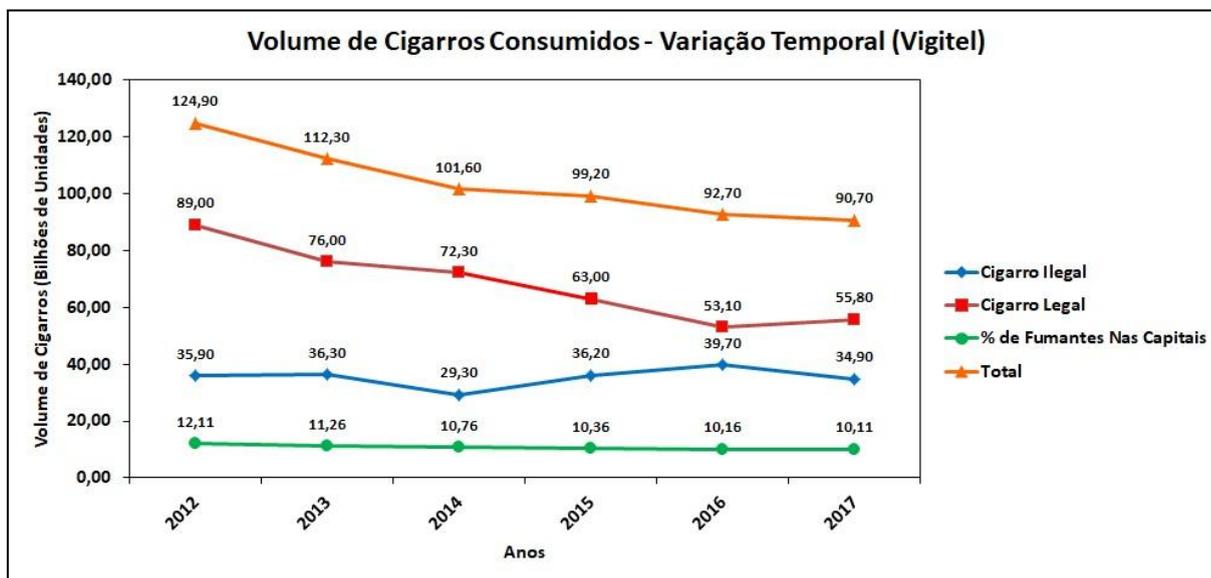


Figura 2: Volume de Cigarros Consumidos - Variação Temporal (Fonte: Vigitel 2017 e Estimativa de Consumo de Cigarros Ilícitos no Brasil, Adaptado).

Quadro 2: Participação do Mercado Ilegal.

Ano	Participação do Mercado Ilegal
2012	28,74 %
2013	32,32 %
2014	28,84 %
2015	36,49 %
2016	42,83 %
2017	38,48 %

Vale a pena ressaltar que os valores apresentados no gráfico da Figura 2 contradizem as estimativas e estudos encomendados por empresas de cigarros que operam no Brasil, tais empresas têm apontado enfaticamente um suposto

crescimento do consumo de cigarros ilegais ao mesmo tempo em que veiculam campanhas contra o aumento dos impostos sobre os cigarros (INCA, 2022). Todavia, é possível observar, através da análise do gráfico, que o número de cigarros consumidos, provenientes do mercado legal, diminuiu drasticamente entre os anos de 2012 e 2016 apresentando um leve aumento no ano de 2017 e que o número de cigarros consumidos, procedentes do mercado ilegal, se manteve sem grandes variações. Com tais dados, foi possível determinar a participação do mercado ilegal de cigarros, em termos percentuais, para cada ano conforme pode-se ver no Quadro 2.

Observando o Quadro 2, percebe-se que os cigarros ilegais possuem uma grande participação no mercado de cigarros brasileiro. No Brasil, a Secretaria da Receita Federal, a Polícia Federal e a Polícia Rodoviária Federal vêm atuando de forma conjunta para combater o contrabando e a falsificação de cigarros e, anualmente, as apreensões de cigarros advindos do contrabando vêm aumentando em razão da intensificação dos esforços de repressão (INCA, 2022).

Quadro 3: Apreensões de Cigarros Em R\$ - Variação Temporal (Fonte: Nota Técnica Unafisco N° 25/2022).

Ano	Apreensões de Cigarros (R\$)
2015	R\$ 702.452.697,09
2016	R\$ 910.238.948,60
2017	R\$ 1.080.522.061,60
2018	R\$ 1.355.537.573,11
2019	R\$ 1.161.630.734,59
2020	R\$ 1.130.314.907,61

De acordo com o Fórum Nacional Contra a Pirataria e a Ilegalidade (FNCP, 2022), o comércio ilegal de produtos contrabandeados falsificados e pirateados não efetua o pagamento de tributos e, devido a isto, causa perdas de recursos

fundamentais que poderiam ser utilizados em assistência social, habitação, educação e segurança. Ainda segundo o FNCP (2022), o contrabando impede a geração de empregos no mercado de trabalho formal enquanto financia organizações criminosas, que atuam dentro e fora do Brasil, responsáveis por aumentar a violência nas cidades. As quantidades de apreensões de cigarros ilícitos, em milhões de reais, entre os anos de 2015 e 2020 podem ser vistas no Quadro 3.

Conforme informações disponibilizadas pelo INCA (2022), a Lei 12.546 de 2011, com vigência a partir de 2012, criou uma política de preços mínimos para os cigarros. No ano de 2012 o preço mínimo do maço de cigarro era de R\$ 3,00, aumentando em R\$ 0,50 anualmente até atingir o valor de R\$ 4,50 em 2015. A partir do dia 1º de Maio de 2016, o preço mínimo passou a ser R\$ 5,00, através do Decreto N° 8.656/2016.

Com base nos preços mínimos praticados nos anos de 2015 e a partir de 2016 e na quantidade de cigarros apreendidos em reais (R\$), foi possível estimar a quantidade de maços de cigarros apreendida entre os anos de 2015 e 2020. Os valores encontrados podem ser consultados no Quadro 4.

Quadro 4: Maços de Cigarros Apreendidos - Variação Temporal.

Ano	Maços de Cigarros Apreendidos
2015	156.100.600
2016	182.047.790
2017	216.104.413
2018	271.107.515
2019	232.326.147
2020	226.062.982

Analisando o Quadro 4, podemos notar que a quantidade de maços apreendidos cresceu entre os anos de 2015 e 2018 e que a partir do ano de 2019 as apreensões apresentaram queda. Entretanto, apesar da queda os valores

permaneceram significativamente altos, superando 232 milhões, no ano de 2019, e 226 milhões de maços ilegais, no ano de 2020.

1.2) DESTINAÇÃO DOS CIGARROS ILEGAIS

Em consonância com informações fornecidas pela Receita Federal (2022), as mercadorias apreendidas podem ser destruídas, leiloadas, doadas ou incorporadas. A legislação vigente, no Brasil, determina que artigos como cigarros e derivados do tabaco devem ser destruídos por meio de procedimentos que garantam a descaracterização do produto tornando-o impróprio para os fins a que se destinava originalmente ou retirando sua atratividade comercial.

A quantidade de cigarros destruídos em reais (R\$) de janeiro de 2019 a dezembro de 2021 é disponibilizada pela Receita Federal (2022). Os dados foram organizados, de maneira a tornar possível analisar-se qual a quantidade de cigarros destruídos, em reais (R\$), nos anos de 2019 até o ano de 2021, conforme observa-se no gráfico da Figura 3.

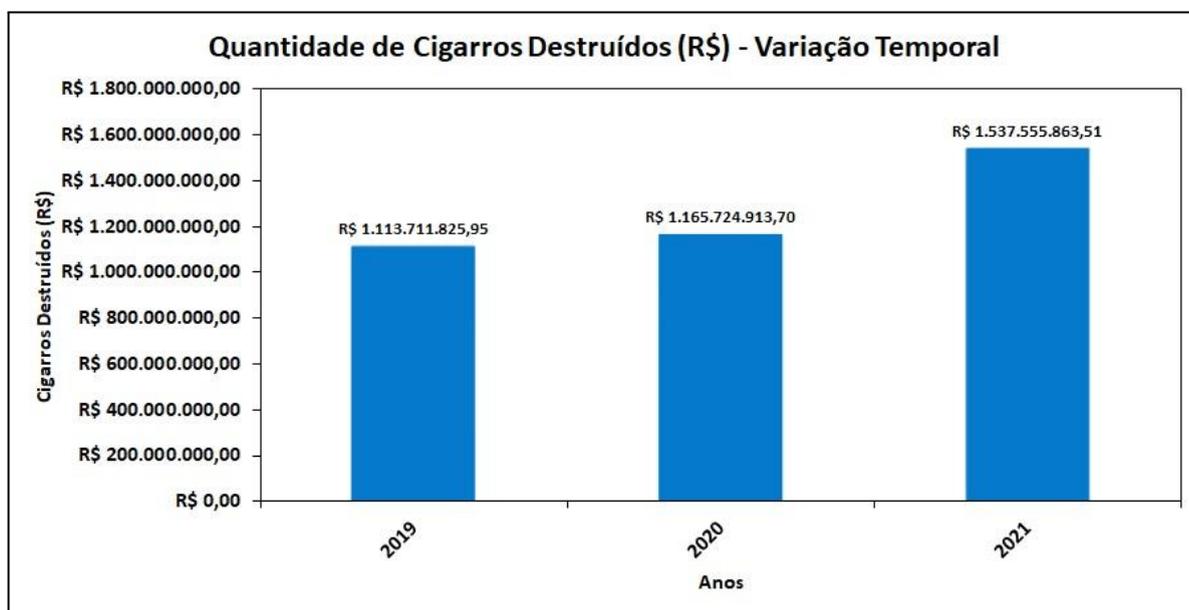


Figura 3: Quantidade de Cigarros Destruidos (R\$) - Variação Temporal (Fonte: Receita Federal, Adaptado).

Observando o gráfico, da Figura 3, é possível dizer que de 2019 até 2021 houve um crescimento expressivo na quantidade de cigarros destruídos. A tendência

observada, a partir do gráfico, indica que as apreensões estão se intensificando cada vez mais ao longo dos anos.

1.3) OBJETIVOS

Pode-se dizer que o contrabando de cigarros e outros produtos derivados do tabaco é um problema de natureza complexa e que a quantidade de cigarros ilegais destruídos é bastante expressiva. Diante deste cenário, este trabalho tem como principal objetivo estudar a viabilidade da utilização de um gás combustível, produzido por meio da gaseificação do cigarro apreendido, em diversos ciclos de potência para a geração de energia elétrica.

Além disso, o presente trabalho objetiva analisar quais as vantagens e desvantagens de cada ciclo bem como seus rendimentos térmicos. Para isto, faz-se necessário descrever de maneira detalhada as etapas de produção do gás combustível bem como realizar sua caracterização, por meio de ensaios, determinando sua composição química e seu poder calorífico inferior (PCI).

2) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1) GASEIFICAÇÃO

Pode-se definir gaseificação como um processo termoquímico com o objetivo de se converter um insumo sólido em um gás combustível através de sua oxidação parcial a temperaturas intermediárias, ou seja, temperaturas acima das recomendadas nos processos de pirólise rápida (400 °C a 600 °C) e abaixo das recomendadas nos processos de combustão (900 °C a 1700 °C) (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008; FEAM/DPED/GEMUC, 2012). O processo pode ser de fluxo contínuo ou batelada, a técnica mais comum é a de oxidação parcial que consiste em se utilizar um agente de gaseificação (oxigênio, ar ou vapor d'água quente) em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para a combustão) para a produção de uma mistura gasosa conhecida como syngas ou gás de síntese (FEAM/DPED/GEMUC, 2012).

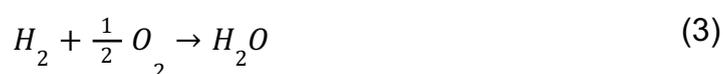
O gás de síntese é rico em monóxido de carbono e hidrogênio, porém contém também dióxido de carbono e, dependendo das condições, metano, hidrocarbonetos

leves, nitrogênio e vapor d'água em diferentes proporções. As reações que ocorrem durante o processo de gaseificação são de natureza complexa e ainda não muito bem compreendidas em sua totalidade, estas podem ser subdivididas em quatro etapas físico-químicas distintas e que ocorrem em temperaturas diferentes, tais etapas são: secagem, pirólise, combustão e redução (FEAM/DPED/GEMUC, 2012).

A etapa de secagem consiste em um processo endotérmico que direciona o calor da combustão para o processo de evaporação da água presente na biomassa sólida de forma a reduzir a umidade. Em seguida, quando a temperatura do processo atinge a faixa de 230 °C a 350 °C inicia-se o processo de pirólise, nesta etapa os compostos voláteis, como a lignina, evaporam. Pode-se representar o processo de pirólise através da equação abaixo:



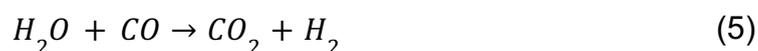
A energia térmica necessária para as demais reações endotérmicas da gaseificação, são fornecidas na etapa de combustão, por se tratar de um processo exotérmico. O oxigênio introduzido no reator irá reagir com o combustível produzindo dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O) que serão reduzidos posteriormente. As equações referentes à etapa de combustão podem ser vistas abaixo:



Por fim, na etapa de redução, conhecida propriamente como gaseificação, várias outras reações endotérmicas irão influenciar na composição final do gás de síntese. De forma geral, quanto maior a taxa de formação de hidrogênio (H_2) e monóxido de carbono (CO) na composição final do gás maior sua qualidade. As

reações conhecidas na etapa de redução são: reação de Boudouard, reação Shift, reação de metanização e reação água-gás.

A reação de redução Boudouard (Eq. 4) ocorre quando o dióxido de carbono, presente no gaseificador, reage com o char, representado pelo carbono (C), para formar monóxido de carbono. A reação Shift (Eq. 5) é importante e desejável para a composição final do gás de síntese já que reduz vapor d'água com monóxido de carbono para produzir gás hidrogênio, que apresenta um elevado poder calorífico. O metano é formado pela reação de metanização (Eq. 6), que consiste na reação do carbono com o hidrogênio. A reação água-gás (Eq. 7) é a oxidação parcial do carbono pelo vapor d'água proveniente de diferentes fontes no reator, dentre as quais podemos citar: evaporação na etapa de secagem, ar de entrada e etapa de pirólise. Tais reações podem ser vistas abaixo:



A composição química dos gases e a produção concomitante de combustíveis sólidos (carvão) e líquidos condensáveis (pirolenhosos) dependem de inúmeros fatores, dentre os quais pode-se citar: tipo de forno de gaseificação, forma de fornecimento de energia ao processo, introdução ou não de vapor d'água junto ao comburente (oxigênio e/ou ar atmosférico), tempo de retenção da carga, sistema de retirada de gases e outros produtos e da matéria orgânica utilizada (FEAM/DPED/GEMUC, 2012).

A gaseificação com ar produz um gás de baixo poder calorífico, de aproximadamente 5 MJ/Nm³, e contendo por volta de 50% em volume de nitrogênio. Já quando a gaseificação é realizada com oxigênio puro ou misturas de oxigênio com ar ou vapor d'água, o gás obtido tem um maior poder calorífico, devido ao fato de que é um gás isento ou com baixos teores de nitrogênio livre na mistura, e pode alcançar um poder calorífico de aproximadamente 10 a 15 MJ/Nm³ (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

Vale ressaltar que, para a geração de energia em ciclos termoelétricos utiliza-se principalmente a gaseificação pressurizada, porém tais sistemas apresentam problemas ainda não solucionados como, por exemplo, a alimentação de combustível, a redução do teor de alcatrão do gás, a formação de óxidos de nitrogênio e a filtragem do gás quente. Além disso, a maioria dos gaseificadores que se tornaram totalmente operacionais e comerciais foram aqueles projetados para fins de geração de calor em relação àqueles para fins de geração de energia elétrica (FEAM/DPED/GEMUC, 2012).

A técnica de gaseificação, apesar de extremamente versátil, apresenta problemas na transformação de todo o seu potencial teórico em uma tecnologia viável. As grandes dificuldades com relação a este processo residem no projeto de um equipamento que produza um gás de qualidade, confiável, seguro e adequado às condições particulares do combustível e da operação (FEAM/DPED/GEMUC, 2012).

2.2) PODER CALORÍFICO

2.2.1) ENTALPIA DE COMBUSTÃO E ENTALPIA DE FORMAÇÃO

A entalpia de reação (h_R) é definida como a diferença entre a entalpia dos produtos (H_{prod}) em um estado especificado e a entalpia dos reagentes (H_{reag}) no mesmo estado, para uma reação completa. Nos processos de combustão, a entalpia de reação é chamada de entalpia de combustão (h_C), esta representa a quantidade de calor liberada durante um processo de combustão em regime permanente quando 1 kmol (ou 1 kg) de combustível é queimado completamente a uma

temperatura e pressão especificadas (ÇENGEL e BOLES, 2013). A entalpia de combustão pode ser expressa através da seguinte equação:

$$h_C = H_{prod} - H_{reag} \quad (8)$$

A entalpia de combustão é uma propriedade muito útil para a análise dos processos de combustão dos combustíveis, porém, pelo fato de existirem inúmeros combustíveis e misturas de combustíveis, não é prático relacionar os valores da entalpia de combustão para todos os casos possíveis. Para representar a energia química de um elemento ou um composto em um determinado estado de referência, de maneira mais prática, utiliza-se a propriedade denominada de entalpia de formação (\bar{h}_f) (ÇENGEL e BOLES, 2013).

A entalpia de formação pode ser definida como a entalpia de uma substância em um estado especificado devido a sua composição química. Para o estado de referência padrão, ou seja, considerando-se uma temperatura de 25 °C e uma pressão de 1 atm a entalpia de formação é representada como \bar{h}_f^o (ÇENGEL e BOLES, 2013).

2.2.2) PODER CALORÍFICO SUPERIOR E PODER CALORÍFICO INFERIOR

Poder calorífico é a quantidade de calor gerado por unidade de massa ou de volume de um combustível submetido ao processo de combustão à pressão constante. Numericamente, corresponde ao módulo da entalpia de combustão (PERA, 1990).

Distinguem-se dois poderes caloríficos, o poder calorífico superior e o poder calorífico inferior. O poder calorífico superior ou PCS de um combustível corresponde à quantidade de calor liberada na combustão completa de uma unidade de massa de combustível seco, ao final do processo de combustão a água encontra-se em estado líquido (condensada) e o calor proveniente desta condensação é recuperado (CIAMPI, 1992). Por outro lado, o poder calorífico inferior ou PCI é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzirem-se as perdas referentes à evaporação da água, ou seja, é a

quantidade de calor produzido quando considera-se a água em estado de vapor no final do processo de combustão (CIAMPI, 1992; PESSOA FILHO, 2013).

2.2.3) DETERMINAÇÃO DO PCS E PCI

O PCS pode ser obtido experimentalmente por meio de um equipamento denominado bomba calorimétrica ou calorímetro (PESSOA FILHO, 2013), este método é particularmente interessante para combustíveis que exibem variações consideráveis na composição como, por exemplo, o carvão, o gás natural e óleo combustível (ÇENGEL e BOLES, 2013). Quando a composição do combustível é conhecida o poder calorífico superior pode ser determinado por meio de cálculos estequiométricos e entalpia de formação dos compostos envolvidos (ÇENGEL e BOLES, 2013). Neste trabalho ambos os métodos serão usados em diferentes ocasiões.

Entretanto, em um processo real de combustão a água permanece em estado de vapor e é liberada juntamente com outros gases gerados no processo. Sendo assim, para aplicações práticas, adota-se o PCI para que o valor de calor produzido seja mais próximo da realidade (PESSOA FILHO, 2013).

O PCI é obtido deduzindo-se do PCS a quantidade de energia, em forma de calor, necessária para vaporizar a água presente no combustível e a água formada durante o processo de combustão do hidrogênio presente no combustível (CIAMPI, 1992). Para um combustível seco, ou seja, sem umidade, deve-se deduzir do PCS somente a quantidade de energia necessária para evaporar a água formada durante o processo de combustão do hidrogênio, portanto o PCI em base seca pode ser calculado através da seguinte equação:

$$PCI_{BS} = PCS_{BS} - h_{lv} \cdot m \quad (9)$$

onde, PCI_{BS} é o poder calorífico inferior em base seca, PCS_{BS} é o poder calorífico superior em base seca, h_{lv} é a entalpia de vaporização da água (a 20 °C) e m é a massa de vapor presente nos gases da combustão por unidade de massa do combustível (CIAMPI, 1992; PESSOA FILHO, 2013).

A combustão do hidrogênio foi apresentada através da reação química descrita na Eq. (3). Sabemos que o hidrogênio possui massa molar igual a, aproximadamente, 1 g/mol e que o oxigênio possui massa molar igual a, aproximadamente, 16 g/mol. Sendo assim, a partir da Eq. (3) pode-se escrever a seguinte equação:

$$2g + 16g = 18g \quad (10)$$

A partir da equação acima, pode-se concluir que a massa de água formada durante a combustão do hidrogênio é equivalente a 9 vezes a massa de hidrogênio presente no combustível. Portanto, a Eq. (9) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$PCI_{BS} = PCS_{BS} - h_{lv} \cdot (9 \cdot H) \quad (11)$$

onde, H é a massa de hidrogênio contida no combustível por unidade de massa de combustível.

As Eqs. (8) e (11) se aplicam somente a combustíveis secos. Para determinar-se o PCI de um combustível úmido, isto é, o PCI em base úmida é preciso deduzir-se a quantidade de energia necessária para evaporar a umidade (CIAMPI, 1992). Dessa forma, obtém-se a seguinte equação:

$$PCI_{BU} = PCI_{BS} \cdot \left(1 - \frac{TU}{100}\right) - h_{lv} \cdot \left(\frac{TU}{100}\right) \quad (12)$$

onde, PCI_{BU} é o poder calorífico inferior em base úmida e TU é a porcentagem em massa de umidade da amostra. O PCI_{BU} também é chamado de poder calorífico útil ou PCU (PESSOA FILHO, 2013).

2.3) EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE E PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA EM REGIME PERMANENTE

Durante um processo com escoamento em regime permanente, a quantidade total de massa contida dentro de um volume de controle não muda com o tempo. Sendo assim, o princípio de conservação da massa exige que a quantidade total de massa que entra em um volume de controle seja igual a quantidade total de massa que dele sai (ÇENGEL e BOLES, 2013). Esta afirmação nos leva à equação da continuidade, que pode ser vista abaixo:

$$\Sigma \dot{m}_e = \Sigma \dot{m}_s \quad (13)$$

Além disso, durante um processo em regime permanente, a variação na energia total de um volume de controle é igual a zero. Dessa forma, a quantidade de energia que entra em um volume de controle sob todas as formas (calor, trabalho e fluxo de massa) deve ser igual a quantidade de energia que deixa o volume de controle (ÇENGEL e BOLES, 2013). Desprezando as energias cinética e potencial do fluido, enquanto este escoar através do volume de controle, obtém-se a primeira lei da termodinâmica que pode ser escrita da seguinte forma:

$$\dot{Q}_{V.C} + \Sigma \dot{m}_e h_e = \Sigma \dot{m}_s h_s + \dot{W}_{V.C} \quad (14)$$

Tais equações, dedicadas à análise de volumes de controle, constituem um modelo analítico adequado para a operação, em regime permanente, de dispositivos como: turbinas, bombas/compressores, caldeiras e condensadores. Estes dispositivos representam uma gama enorme de problemas de interesse da análise termodinâmica.

2.4) CICLOS DE POTÊNCIA

Segundo Monteiro (2019), a maioria das usinas envolvendo a geração de energia elétrica por meio de gases combustíveis utilizam ciclos combinados gás-vapor. Turbinas a gás e motores de combustão interna de ciclo Otto são amplamente utilizados para a transformação energética do biogás, gerado a partir de resíduos urbanos em aterros sanitários (GEHM, 2019).

Além disso, mundialmente, a tecnologia mais comum para geração de energia elétrica (a partir de resíduos) é a incineração direta dos resíduos urbanos com subsequente uso do calor produzido em um ciclo Rankine a vapor (LEME, 2010). Por essas razões, neste trabalho será analisado o desempenho do gás de síntese nos ciclos: Rankine, Rankine regenerativo, Brayton, Otto e num ciclo combinado Brayton/Rankine.

2.4.1) CICLO RANKINE

Segundo Borgnakke e Sonntag (2018), o ciclo Rankine é um ciclo baseado em quatro processos que ocorrem em regime permanente. Abaixo, podem ser vistas uma figura representativa do ciclo e também seu diagrama T-s:

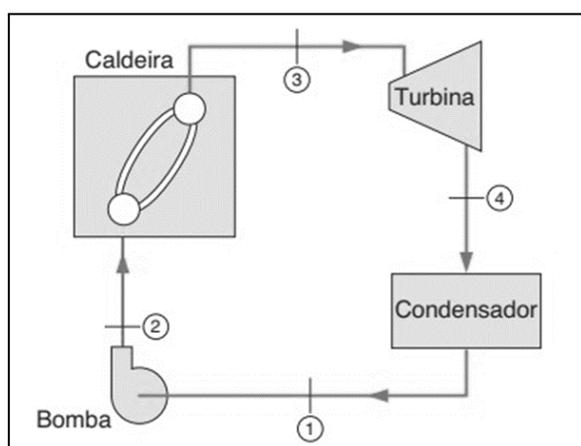


Figura 4a: Ciclo Rankine (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).

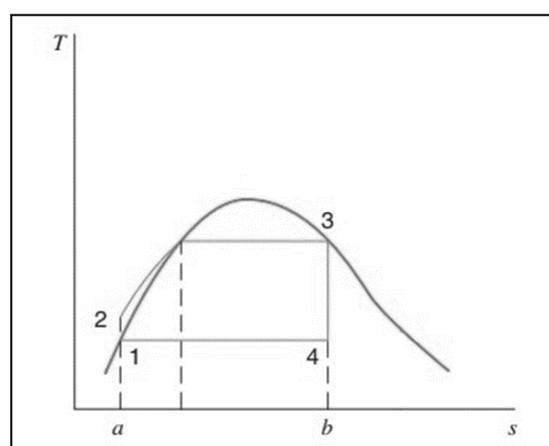


Figura 4b: Diagrama T-s Ciclo Rankine (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).

Os quatro processos em questão são: 1-2) Processo de bombeamento adiabático, na bomba; 2-3) Transferência de calor a pressão constante, na caldeira; 3-4) Expansão adiabática, na turbina e 4-1) Transferência de calor a pressão constante, no condensador. O rendimento térmico do ciclo Rankine é dado pela seguinte equação:

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{\dot{W}_{\text{ciclo}}}{\dot{Q}_H} \quad (15)$$

onde \dot{W}_{ciclo} é o trabalho líquido gerado pelo ciclo e \dot{Q}_H é a transferência de calor ao fluido na caldeira. No ciclo Rankine, qualquer variação que aumente a temperatura média na qual o calor é fornecido, ou que diminua a temperatura média na qual o calor é rejeitado, aumentará o rendimento do ciclo (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018).

Vale ressaltar que, o trabalho líquido e o rendimento de um ciclo Rankine podem ser aumentados pela redução da pressão no condensador, pelo aumento da pressão no fornecimento de calor e pelo superaquecimento do vapor. Além disso, o título do vapor que deixa a turbina aumenta com o superaquecimento do vapor e diminui pelo abaixamento da pressão no condensador e pelo aumento da pressão no fornecimento de calor (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018).

Caso o vapor na saída da turbina apresente um título muito baixo haverá a formação de gotas que causam erosão no equipamento. Em geral, tenta-se manter o título maior que 90%.

2.4.2) CICLO RANKINE COM REAQUECIMENTO

O ciclo com reaquecimento foi desenvolvido para tirar vantagem do aumento de rendimento provocado pela utilização de pressões mais altas e ao mesmo tempo evitar que a umidade seja excessiva nos estágios de baixa pressão da turbina (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018). Abaixo, podem ser vistas uma figura representativa do ciclo e também seu diagrama T-s:

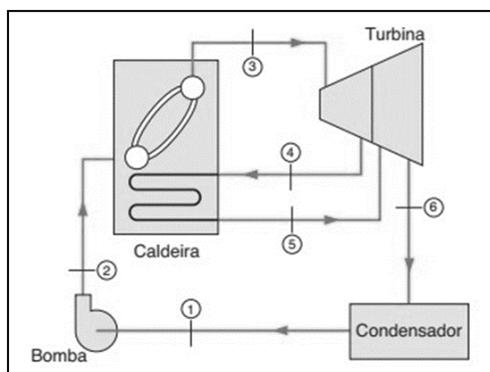


Figura 5a: Ciclo Rankine Com Reaquecimento
(Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).

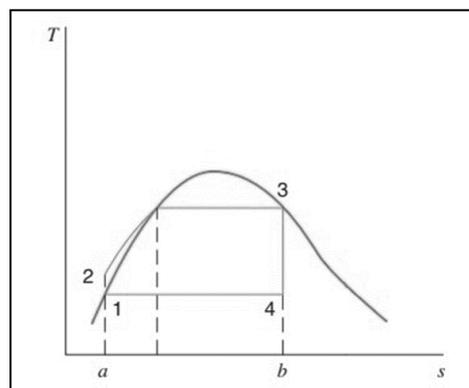


Figura 5b: Diagrama T-s Ciclo Rankine Com Reaquecimento Borgnakke e Sonntag, 2018).

A característica singular desse ciclo é que o vapor, primeiramente, expande até uma pressão intermediária na turbina (etapa 3-4 da Figura 5). Ele, então, é reaquecido na caldeira (etapa 4-5 da Figura 5) e novamente expande na turbina até a pressão de saída (etapa 5-6 da Figura 5).

Neste ciclo, há um ganho muito pequeno de rendimento pelo reaquecimento do vapor, porque a temperatura média na qual o calor é fornecido não muda muito. A principal vantagem desse reaquecimento é a diminuição do teor de umidade nos estágios de baixa pressão da turbina (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018).

2.4.3) CICLO RANKINE REGENERATIVO

2.4.3.1) CICLO RANKINE REGENERATIVO COM AQUECEDOR DE MISTURA

Este ciclo regenerativo envolve a extração de uma parte do vapor que escoo na turbina, após ter sido parcialmente expandido e a utilização de aquecedores de água de alimentação de mistura (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018). A seguir, podem ser vistas uma figura representativa do ciclo e também seu diagrama T-s:

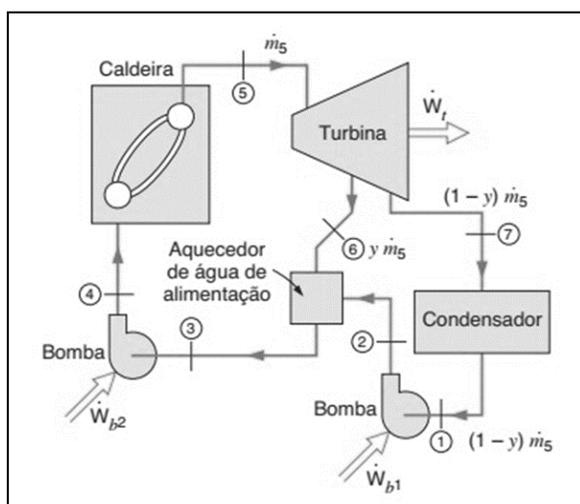


Figura 6a: Ciclo Rankine Regenerativo Com Aquecedor de Mistura (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).

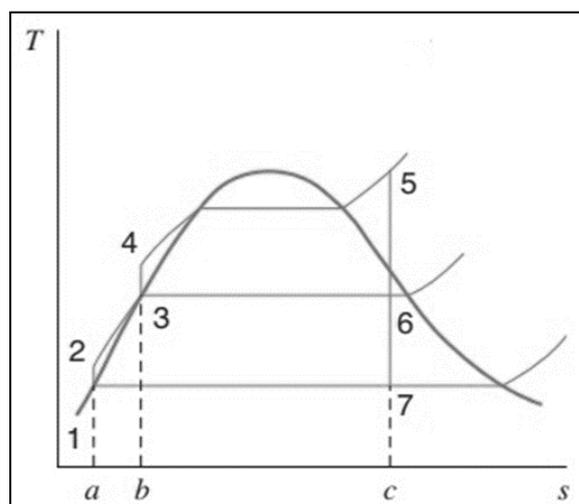


Figura 6b: Diagrama TS Ciclo Rankine Regenerativo Com Aquecedor de Mistura (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).

Conforme observa-se na figura acima, o vapor entra na turbina no estado 5 e uma parte deste sofre uma expansão até atingir o estado 6 e entra no aquecedor de

água de alimentação de mistura. A parte não extraída para o aquecedor de mistura sofre expansão até o estado 7 e é condensado no condensador. O líquido proveniente do condensador é bombeado para o aquecedor de mistura, onde ocorre a mistura do líquido com o vapor extraído da turbina.

O ponto significativo desse ciclo é o aumento da temperatura média na qual o calor é fornecido ao fluido de trabalho (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018). Para este ciclo, considerando a condição-limite como líquido saturado no estado 3, a máxima fração de extração de vapor (y) que pode ser utilizada é dada pela seguinte expressão:

$$y = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2} \quad (16)$$

onde, h_2 , h_3 e h_6 correspondem à entalpia do fluido de trabalhos nos estados 2, 3 e 6 (indicados na Figura 6), respectivamente.

2.4.3.2) CICLO RANKINE REGENERATIVO COM AQUECEDOR DE SUPERFÍCIE

Este ciclo é praticamente idêntico ao ciclo Rankine com aquecedor de mistura, porém, ao invés de um aquecedor de mistura, utiliza-se um aquecedor de alimentação de água denominado aquecedor de superfície. Neste tipo de aquecedor, o vapor extraído da turbina e a água não se misturam. Pode-se observar uma representação deste equipamento na Figura 7.

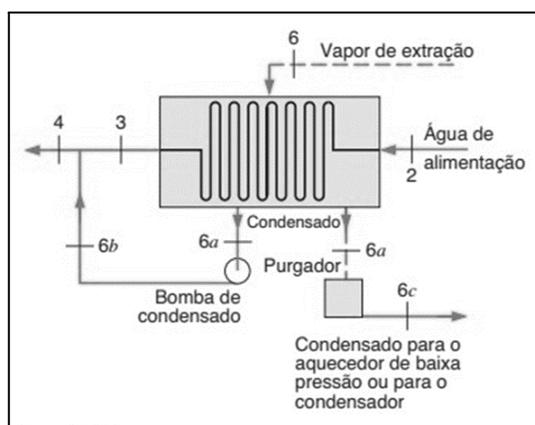


Figura 7: Aquecedor de Superfície (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).

Nesse tipo de aquecedor a pressão do vapor pode ser diferente da pressão da água de alimentação. O condensado pode ser bombeado para a tubulação de água de alimentação ou removido, através de um purgador que permite que o líquido escoe para uma região de pressão inferior como, por exemplo, um aquecedor de baixa pressão ou para o condensador principal (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018).

Considerando um aquecedor de superfície que opera na ausência da bomba de condensado (representada na Figura 7), pode-se admitir que as temperaturas nos estados 3, 4 e 6a, indicados na Figura 7, sejam iguais (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018). Dessa forma, a máxima fração de extração de vapor que pode ser utilizada é obtida através da seguinte equação:

$$y = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_{6a}} \quad (17)$$

onde, h_2 , h_3 , h_6 e h_{6a} correspondem à entalpia do fluido de trabalho nos estados 2, 3, 6 e 6a, indicados na Figura 7, respectivamente.

Segundo Borgnakke e Sonntag (2018), os aquecedores de mistura têm vantagem sobre os aquecedores de superfície pois apresentam menor custo e melhores características de transferência de calor. Porém, têm como desvantagem a necessidade de utilização de uma bomba extra para transportar o fluido de trabalho do aquecedor de mistura para a caldeira. O diagrama T-s para este ciclo é semelhante ao apresentado na Figura 6b.

2.4.4) CICLO BRAYTON

O ciclo Brayton pode ser caracterizado como um ciclo que apresenta dois processos isobáricos e dois processos isentrópicos, porém, ao contrário do ciclo Rankine, o fluido de trabalho não apresenta mudança de fase nos processos que ocorrem a pressão constante, isto é, o fluido de trabalho sempre se encontra na fase gasosa. O ciclo padrão a ar Brayton é o ciclo ideal para a turbina a gás simples (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018). O ciclo Brayton é representado na Figura 8a e

seu diagrama T-s pode ser visto na Figura 8b, seu rendimento térmico pode ser calculado através da Eq. (18).

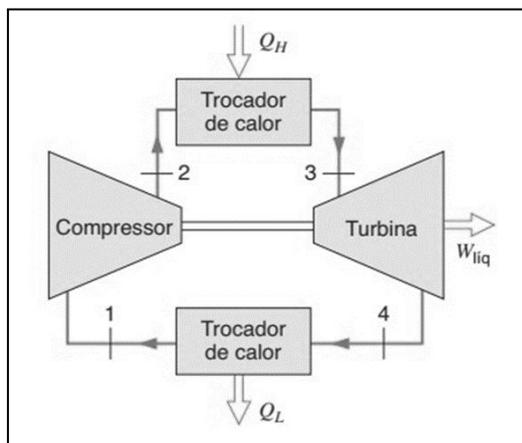


Figura 8a: Ciclo Brayton (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).

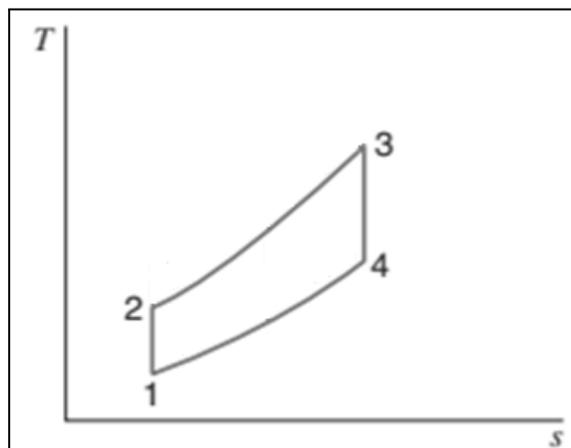


Figura 8b: Diagrama T-s Ciclo Brayton (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{(k-1)}{k}}} \quad (18)$$

onde, P_1 e P_2 são as pressões dos estados 1 e 2, representados na Figura 8, respectivamente e k é a razão entre os calores específicos a pressão e volume constantes do ar. Na prática adota-se $k = 1,4$.

Observando a Eq. (18), conclui-se que o rendimento do ciclo padrão a ar Brayton é função apenas da relação de pressão isoentrópica que, usualmente, assume valores dentro de um range que vai de 5 a 20 (ÇENGEL e BOLES, 2013). Adicionalmente, a turbina a gás real difere do ciclo ideal principalmente devido às irreversibilidades no compressor e na turbina, devido à queda de pressão nas passagens do fluido e na câmara de combustão (ou no trocador de calor de um ciclo fechado) (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018).

2.4.5) CICLO BRAYTON COM REGENERAÇÃO

O rendimento do ciclo de turbina a gás pode ser melhorado pela introdução de um regenerador. Calor pode ser transferido dos gases de descarga da turbina para os gases a alta pressão que deixam o compressor (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018).

A temperatura do gás a alta pressão que deixa o regenerador pode, no caso ideal, ser igual a temperatura do gás que deixa a turbina (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018). Pode-se observar uma representação deste ciclo na Figura 9 e seu rendimento térmico pode ser determinado através da Eq. (19).

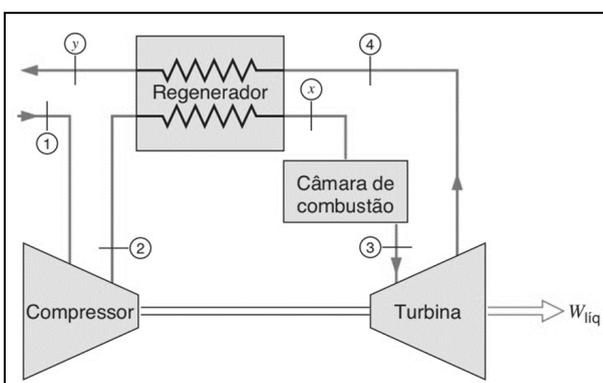


Figura 9a: Ciclo Brayton Com Regeneração
(Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).

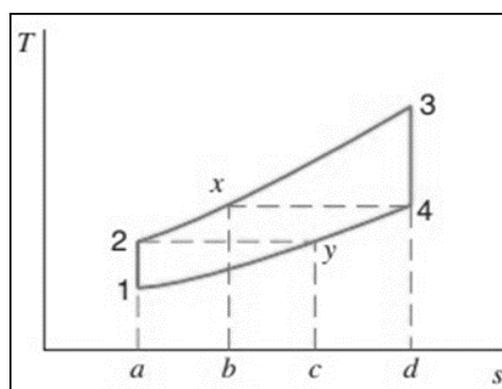


Figura 9b: Ciclo Brayton Com Regeneração
(Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{T_2}{T_3} \quad (19)$$

onde T_2 e T_3 são as temperaturas nos estados 2 e 3, representados na figura 9, respectivamente. Observando a Eq. (19), podemos afirmar que para o ciclo ideal com regeneração, o rendimento térmico depende não somente da relação de pressão, mas também da relação das temperaturas máximas e mínimas. Ademais, diferentemente do ciclo Brayton, o rendimento diminui com um aumento da relação de pressão (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018).

2.4.6) CICLO OTTO

O ciclo padrão a ar Otto é um ciclo ideal que se aproxima do motor de combustão interna de ignição por centelha (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018). Na figura a seguir, podemos ver os diagramas P-v e T-s do ciclo Otto:

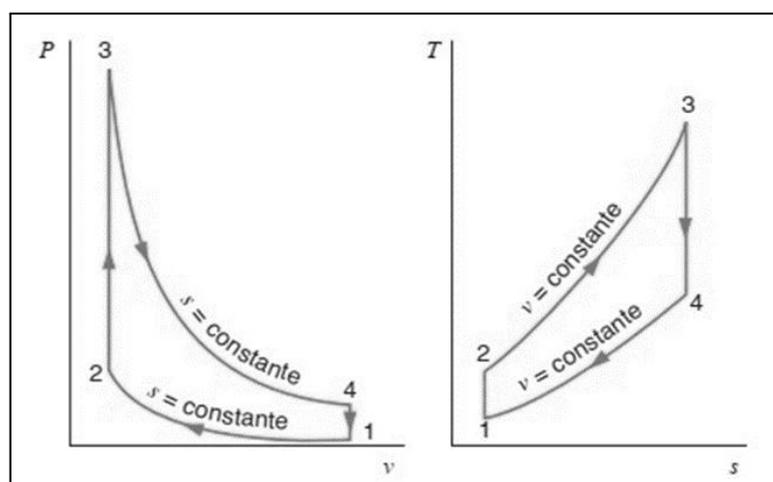


Figura 10: Diagramas P-v e T-s do Ciclo Otto (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).

Conforme observado na figura acima, o processo 1-2 é uma compressão isentrópica do ar quando o pistão se move, do ponto morto inferior para o ponto morto superior. O calor é então transferido para o ar, a volume constante, enquanto o pistão está momentaneamente em repouso no ponto morto superior (processo 2-3). O processo 3-4 é uma expansão isentrópica e o processo 4-1 é o de rejeição de calor do ar, enquanto o pistão está no ponto morto inferior (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018). O rendimento térmico do ciclo Otto pode ser expressado através da seguinte expressão:

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{1}{(r_v)^{k-1}} \quad (20)$$

onde, r_v é a relação de compressão. A relação de compressão pode ser expressa através da seguinte equação:

$$r_v = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{i}n}} \quad (21)$$

onde, V_1 , V_2 , V_3 e V_4 são os volumes nos estados 1, 2, 3 e 4, representados na Figura 10, respectivamente e $V_{m\acute{a}x}$ e $V_{m\acute{i}n}$ são os volumes máximo e mínimo do cilindro do motor. As relações de compressão usuais variam num range de 1 a 14 (ÇENGEL e BOLES, 2013).

Observando a Eq. (20), podemos concluir que o rendimento do ciclo padrão Otto é função apenas da relação de compressão. Além disso, o rendimento aumenta com o aumento dessa relação. A máxima relação de compressão que pode ser utilizada é aquela em que a detonação é evitada (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018).

2.4.7) CICLO COMBINADO BRAYTON/RANKINE

Existem muitas situações em que é desejável combinar dois ciclos de potência. Os ciclos combinados são muito utilizados quando a diferença entre as temperaturas máxima e mínima do ciclo é grande ou quando deseja-se recuperar calor em um processo de modo a aumentar a eficiência térmica (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018).

O ciclo combinado Brayton/Rankine é composto por uma turbina a gás e um ciclo a vapor do tipo Rankine. Nessa combinação, o resfriamento dos gases de exaustão da turbina a gás é a fonte de energia para os processos de transferência de calor com mudança de fase e de superaquecimento do vapor gerado (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018). Pode-se visualizar uma representação deste ciclo na Figura 11.

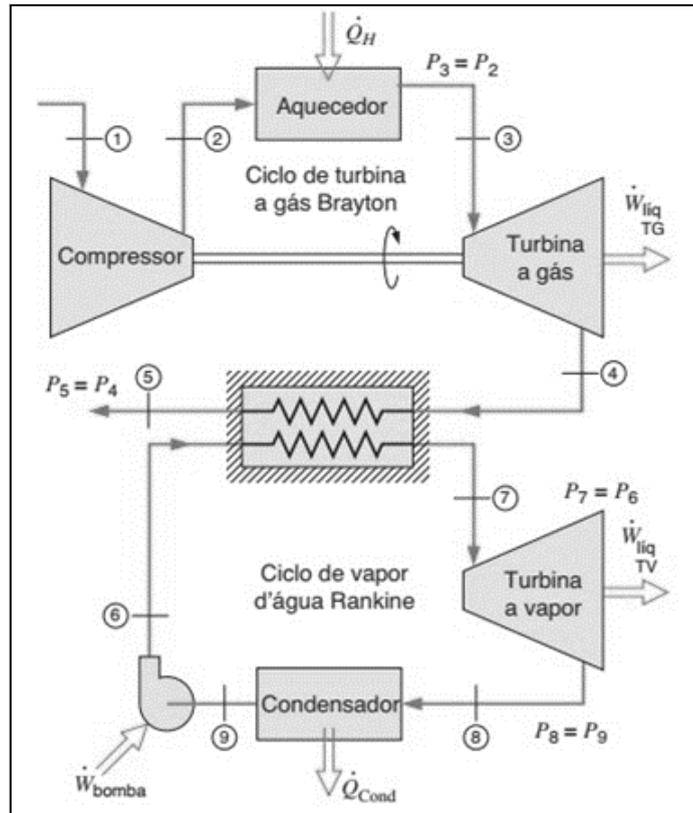


Figura 11: Ciclo Combinado Brayton/Rankine (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018).

2.4.8) EFICIÊNCIAS ISENTRÓPICAS

A maioria dos dispositivos de fluxo constante como, por exemplo, turbinas, compressores e bicos operam em condições adiabáticas. Entretanto, estes mesmos dispositivos não operam em condições isentrópicas.

Para turbinas, a razão entre o trabalho real (produzido pela turbina) e o trabalho adiabático e reversível é denominada eficiência de turbina isentrópica. Tal eficiência pode ser calculada a partir da expressão abaixo:

$$\eta_{turbina} = \frac{h_e - h_s}{h_e - h_{s_s}} \quad (22)$$

onde, h_e é a entalpia do fluido na entrada da turbina, h_s é a entalpia do fluido na saída da turbina e h_{s_s} é a entalpia na saída da turbina considerando-se trabalho

isentrópico, isto é, a entropia na entrada da turbina (s_e) é igual a entropia na saída turbina (s_s).

Define-se também a eficiência de bomba ou compressor isentrópico. Contudo, esta é definida como a razão entre o trabalho adiabático e reversível e o trabalho real realizado pelo equipamento. Dessa forma, tal eficiência pode ser expressa através da seguinte equação:

$$\eta_{bomba/compressor} = \frac{h_e - h_{s_s}}{h_e - h_s} \quad (23)$$

Segundo Borgnakke e Sonntag (2018), as eficiências de turbinas isentrópicas assumem valores entre 0,70 e 0,88. O mesmo vale para as eficiências de bombas/compressores isentrópicos.

2.5) TERMOGRAVIMETRIA

A termogravimetria ou análise termogravimétrica baseia-se no estudo da variação de massa de uma amostra, resultante de uma transformação física (sublimação, evaporação, condensação) ou química (degradação, decomposição, oxidação) em função do tempo ou da temperatura (MOTHÉ e AZEVEDO, 2009). A massa da amostra, em uma atmosfera controlada, é registrada continuamente em função da temperatura ou do tempo, enquanto a temperatura da amostra é aumentada, geralmente, linearmente com o tempo (SKOOG; HOLLER; NIEMAN, 2002).

Os resultados das curvas de variação de massa versus temperatura são denominados ou conhecidos como curva termólise, curva pirólise, termograma ou curva de análise termogravimétrica. Essas curvas apresentam informações sobre estabilidade térmica e composição da amostra original, estabilidade térmica e composição de algum composto intermediário que pode ter sido formado e ainda composição de resíduos, se houver (MOTHÉ e AZEVEDO, 2009).

Segundo Karatepe e Kuçukbayrak (1993), a termogravimetria, devido a suas características, é uma técnica extremamente adequada para realização de análise

imediate em amostras. A análise imediata consiste na determinação dos teores de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo de uma substância (CIAMPI, 1992).

2.6) CALORIMETRIA

A transferência de energia térmica entre corpos distintos é denominada calor. A palavra calorimetria foi criada para tratar do estudo da troca de energia, em forma de calor, entre corpos e tem sua origem provinda da termodinâmica (PEREIRA, 2014).

Como mencionado anteriormente, o PCS pode ser determinado através de aparelhos denominados calorímetros. Os calorímetros são instrumentos destinados a medir transformações energéticas onde há alterações de temperatura e troca de calor com o ambiente (CIAMPI, 1992).

Um calorímetro comum, possui duas partes importantes: o vaso calorimétrico (local onde o processo se realiza) e o ambiente ou vizinhança. A classificação mais geral, em relação às trocas de calor entre vaso calorimétrico e o ambiente, conduz a três tipos principais de calorímetros: adiabático, isoperibólico e de condução de calor (CIAMPI, 1992).

2.7) CROMATOGRAFIA

A cromatografia é, antes de tudo, um método físico-químico de análise largamente empregado tanto na separação de compostos químicos como na identificação (análise qualitativa) e quantificação (análise quantitativa) das espécies separadas. Gases ou substâncias voláteis podem ser separados através da técnica de cromatografia gasosa (Nascimento et. al, 2018).

A cromatografia gasosa (CG) é uma técnica com excelente poder de resolução e possibilita a análise de inúmeras substâncias em uma mesma amostra. Além disso, a alta sensibilidade do método permite que pequenas quantidades de amostras possam ser utilizadas (PERES, 2002). É possível a detecção em escala de nano a picogramas, isto é, de 10^{-9} a 10^{-12} (AMORIM, 2019).

Neste método, a amostra (gás, líquido ou sólido em solução) é injetada com auxílio de uma microseringa ou válvula apropriada, no injetor, que também é o vaporizador e os seus vapores são arrastados para o interior da coluna pela fase

móvel (gás de arraste). Na saída da coluna, a amostra passa pelo detector, que envia um sinal para o registrador, este sinal é proporcional à quantidade de cada componente, o que permitirá uma análise quantitativa. Vale a pena acrescentar que a cromatografia a gás é talvez o método de análise mais preciso (AMORIM, 2019).

3) METODOLOGIA E RESULTADOS

3.1) GERAÇÃO DO SYNGAS

Conforme dito anteriormente, o syngas é obtido através do processo de gaseificação. Contudo, antes que o gás possa ser produzido é necessário realizar a preparação do material, neste caso o cigarro, que será utilizado no processo.

A preparação consiste em triturar uma unidade de pacote de cigarros manualmente e com auxílio de ferramentas apropriadas para tal finalidade. Nesta etapa não é necessário que o material atinja uma granulometria fina, isto é, as partículas podem ser relativamente grandes.

Deve-se garantir que todos os materiais presentes no pacote sejam triturados, com o intuito de que o gás gerado seja o mais próximo possível de um gás eventualmente produzido em um processo de larga escala. O material do pacote consiste basicamente de uma fina embalagem plástica (que envolve o pacote), a embalagem do próprio pacote (feita de papelão) e todo o material presente nos maços de cigarros dentro do pacote (unidades de cigarros, papel, papelão e alguns plásticos). Nas imagens seguintes podem-se observar as amostras antes e depois do processo de trituração:

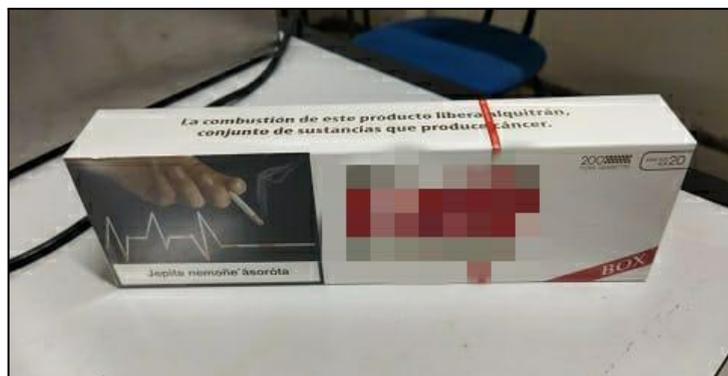


Figura 12: Pacote de Cigarros.



Figura 13a: Pacote de Cigarros Triturado.



Figura 13b: Sobras de Cigarros Triturado.

Conforme observa-se na Figura 13a, foi triturada uma massa igual a 150,98 g. A massa utilizada no processo de gaseificação foi de 143,87 g, a Figura 13b mostra que as sobras de cigarro triturado que não foram utilizadas no processo correspondem a 7,11 g. Uma figura do reator, já em funcionamento, pode ser vista abaixo:



Figura 14: Reator de Gaseificação.

O reator é configurado de modo a atingir uma temperatura máxima de 850 °C, entretanto o processo de gaseificação inicia-se em temperaturas inferiores a esta, conforme exposto anteriormente. A partir do duto de saída de gás foram coletadas duas amostras de gás de síntese, uma quando o reator estava em uma temperatura de 670 °C e outra a 800 °C.

As amostras são retiradas do interior do reator por meio de uma bomba de vácuo, passam por um sistema de filtragem (com sílica gel), que tem como objetivo remover do gás o alcatrão e demais impurezas formadas durante a gaseificação, e em seguida são armazenadas em bags de amostragem para gases. Nas imagens a seguir observa-se a bomba de vácuo, o sistema de filtragem e os bags de amostragem já preenchidos com o syngas:

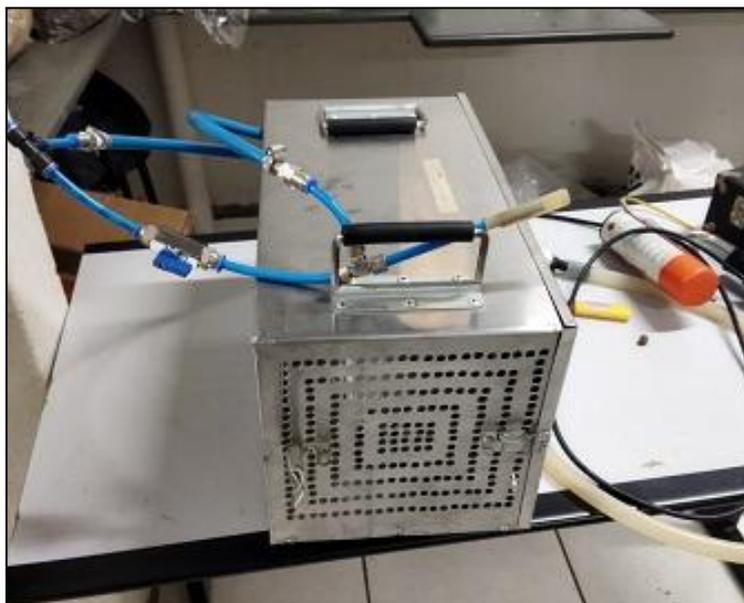


Figura 15: Bomba de Vácuo.



Figura 16a: Sistema de Filtragem.



Figura 16b: Recipientes Com Sílica.



Figura 17: Bags de Amostragem Com Syngas.

Em seguida, as amostras coletadas devem ser levadas para ensaio de cromatografia para que suas composições químicas possam ser determinadas. O material que não foi gaseificado fica retido no reator na forma de cinzas. Para que estas possam ser coletadas é necessário esperar que o reator esfrie até a temperatura ambiente para que seja possível manuseá-lo com segurança. Na figura abaixo é possível observar as cinzas restantes do processo:



Figura 18: Cinzas Restantes da Gaseificação.

Conforme exposto anteriormente, a massa de material triturado colocada no reator foi de 143,87 g. Ao final do processo de gaseificação, conforme observa-se na Figura 18, o material restante, na forma de cinzas, foi de 21,20 g. Portanto, podemos concluir que 85,26 % de toda a massa colocada no reator foi convertida em gás condensável e não-condensável, restando 14,74 % de cinzas.

3.2) ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

Para realização da análise termogravimétrica o conteúdo do pacote de cigarros, apresentado anteriormente na Figura 12, deve ser triturado até atingir uma granulometria fina. O processo de trituração deve ser repetido até que o material adquira o aspecto semelhante ao de um pó.

Em seguida, o material foi disposto em quatro cadinhos para o processo de ensaio termogravimétrico, que consiste na verificação da degradação térmica da amostra, ou seja, a inspeção do comportamento do material por perda de massa em função da temperatura.

Para realização deste procedimento experimental foi utilizado um analisador TGA 2000A, que possui balança analítica com precisão de 10^{-6} g e apresenta sensibilidade de 0,1 °C para as medidas de temperatura. A análise da degradação

foi realizada num range de temperatura de 105°C à 950°C em atmosfera de nitrogênio, conforme a norma ASTM E1131/2014. Abaixo pode-se ver o modelo do analisador em mais detalhes:



Figura 19: Analisador TGA 2000A.

O analisador realiza a pesagem e a tara dos cinco recipientes, quatro deles destinados às amostras do material e um recipiente setado como referência, esta repetibilidade das amostras objetiva aumentar a confiabilidade do teste. As medidas aferidas pelo equipamento foram armazenadas no microcomputador através de um software estatístico.

É possível analisar a degradação mássica do material com a variação de temperatura em três etapas. A primeira etapa consiste no processo de secagem da amostra, a segunda etapa refere-se ao aquecimento, onde ocorre o desprendimento da maior parte dos gases voláteis, e a terceira etapa consiste nos processos de resfriamento das cinzas e desprendimento de um pequeno percentual de voláteis remanescentes. Tais etapas podem ser vistas, de maneira gráfica, na Figura 20. No Quadro 5 são apresentados os resultados da análise imediata das amostras.

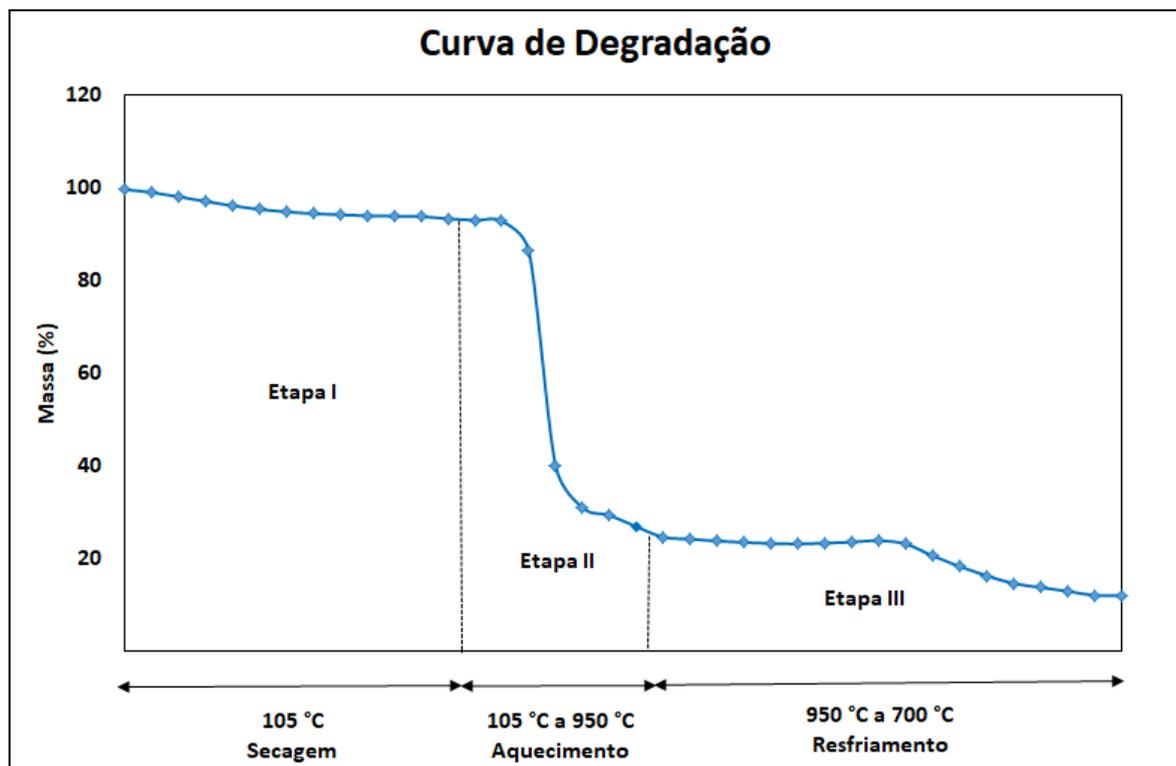


Figura 20: Curva de Degradação da Amostra.

Quadro 5: Análise Imediata de Amostras Padrão.

Parâmetro Analisado	Média [%]	Desvio Padrão [%]	Repetições
Teor de Umidade	6,644	0,093	4
Materiais Voláteis	69,494	0,227	4
Cinzas	11,883	0,496	4
Carbono Fixo	12,031	0,189	4

3.3) ANÁLISE CALORIMÉTRICA

Esta etapa possui como objetivo mensurar o poder calorífico superior e inferior do cigarro triturado. Para isto, deve-se separar duas porções, do material triturado anteriormente, que serão utilizadas na análise calorimétrica.

A primeira porção deve ser colocada em uma estufa a 105 °C até que a umidade presente nesta seja completamente removida. Esta porção, agora sem

umidade, será utilizada para determinação do PCS do material triturado. Em seguida repetiu-se o experimento para as amostras com 6,64 % de umidade, conforme indicado pelo Quadro 5.

Para cada uma das porções (úmida e seca) separaram-se duas amostras, ou seja, duas amostras úmidas e duas amostras secas. Cada uma das amostras foi colocada em um cadinho e pesada em uma balança com precisão de 0,1 mg. Em seguida, o cadinho é colocado dentro de um recipiente, próprio para este tipo de análise, que é lacrado e preenchido com oxigênio puro a 30 bar de pressão. O recipiente é posicionado dentro do calorímetro que deve receber como parâmetro de entrada as massas das amostras registradas pela balança de precisão. Os equipamentos utilizados podem ser vistos nas figuras abaixo:



Figura 21: Balança de Precisão.



Figura 22: Recipiente Para Análise Calorimétrica.

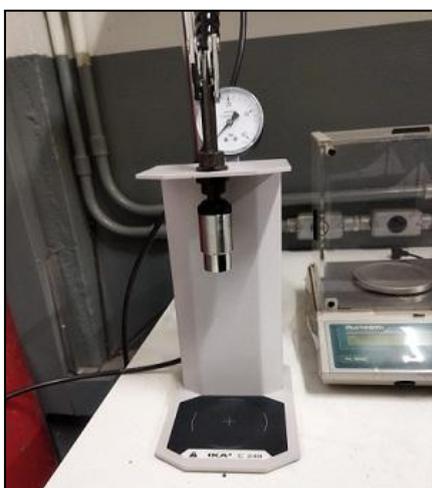


Figura 23: Equipamento para Pressurização.



Figura 24: Calorímetro.

No Quadro a seguir podem ser vistos os resultados obtidos ao final do procedimento:

Quadro 6: Poder Calorífico das Amostras Úmidas e Secas.

Amostra Analisada	Poder Calorífico [MJ/kg]	Poder Calorífico Médio [MJ/kg]	Desvio Padrão [MJ/kg]
Úmida 1	15,517	15,548	0,0438
Úmida 2	15,579		
Seca 1	16,278	16,312	0,0481
Seca 2	16,346		

Com base nos dados apresentados no Quadro 5, pode-se dizer que o PC com 6,64 % de umidade e o seco do cigarro triturado correspondem a 15,548 MJ/kg e 16,312 MJ/kg, respectivamente. Uma comparação entre os PC's do cigarro triturado com o PCS de alguns combustíveis sólidos, bem conhecidos na literatura acadêmica, pode ser vista na Figura 25.

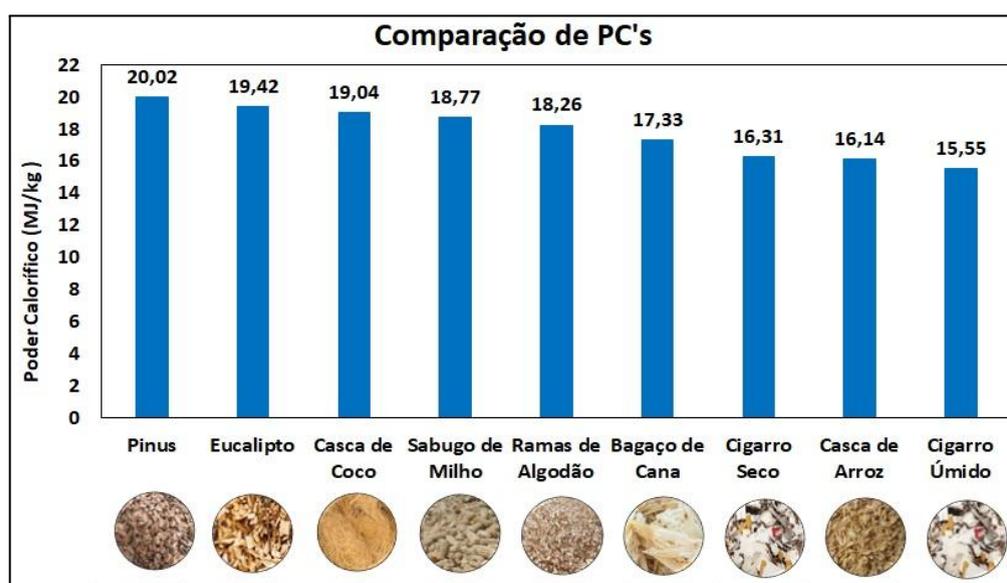


Figura 25: Comparação Entre PC's (Fonte: Jenkins, 1990; Adaptado).

Observando os dados da Figura 25, podemos concluir que o cigarro triturado é um combustível sólido com um poder calorífico superior próximo aos de biomassas amplamente utilizadas. Entretanto, a queima direta do cigarro não é viável devido às emissões de gases prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana resultantes do processo de incineração.

3.4) ANÁLISE CROMATOGRÁFICA

Antes que a análise cromatográfica possa ser feita, é necessário que o cromatógrafo gasoso seja configurado. Uma imagem do cromatógrafo, já devidamente configurado, pode ser vista abaixo:



Figura 26: Cromatógrafo Gasoso.

O procedimento a ser efetuado em seguida consiste em retirar uma amostra do syngas do bag de amostragem, com auxílio de uma seringa própria para tal finalidade, e realizar a injeção do syngas no equipamento. Este procedimento deve ser realizado para as amostras coletadas a 670 °C e 800 °C, conforme mostram as imagens a seguir:

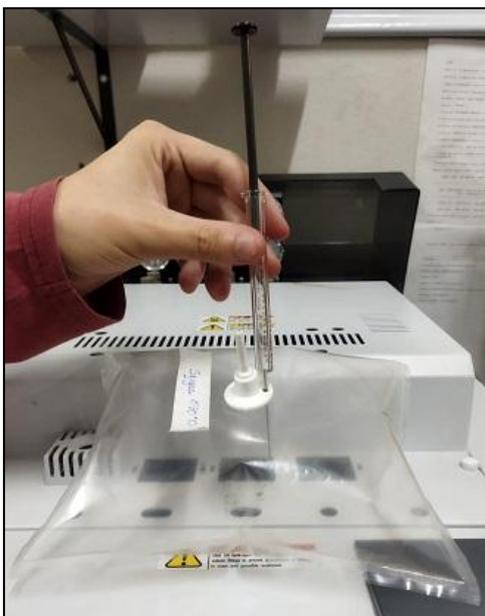


Figura 27a: Remoção da Amostra de Syngas Coletada a 670 °C.



Figura 27b: Injeção da Amostra de Syngas Coletada a 670 °C.



Figura 28a: Remoção da Amostra de Syngas Coletada a 800 °C.



Figura 28b: Injeção da Amostra de Syngas Coletada a 800 °C.

Após a realização da injeção das amostras, o equipamento irá emitir um sinal elétrico característico para cada composto detectado. Realizando-se o tratamento dos sinais emitidos pelo aparelho, obtiveram-se os seguintes resultados:

Quadro 7: Composição Química das Amostras de Gás de Síntese.

Composto	Composição (Syngas 670°C) [% V/V]	Composição (Syngas 800°C) [% V/V]
Metano (CH_4)	0,137	0,000
Eteno (C_2H_4)	0,046	0,005
Etano (C_2H_6)	0,023	0,006
Propadieno (C_3H_4)	0,007	0,000
Propino (C_3H_4)	0,029	0,000
Propeno (C_3H_6)	0,033	0,000
Propano (C_3H_8)	0,026	0,000
Oxigênio (O_2)	7,705	13,539
Nitrogênio (N_2)	64,943	83,475
Monóxido de Carbono (CO)	21,277	0,739
Dióxido de Carbono (CO_2)	5,775	2,237
Total	100,000	100,000

3.6) DETERMINAÇÃO DO PCI DO SYNGAS

Para que o PCI do syngas, coletado em diferentes temperaturas, possa ser determinado é necessário conhecer a entalpia de formação de cada composto detectado. No Quadro 8 pode-se ver a entalpia de formação de cada uma destas substâncias.

Quadro 8: Entalpia de Formação dos Compostos Presentes no Gás de Síntese (Fonte: Borgnakke e Sonntag, 2018; Çengel e Boles, 2013; Cheméo, 2023; NIST, 2023).

Composto	Entalpia de Formação [kJ/kmol]
Metano (CH_4)	-74.873
Eteno (C_2H_4)	+52.467
Etano (C_2H_6)	-84.740
Propadieno (C_3H_4)	+192.300
Propino (C_3H_4)	+185.400
Propeno (C_3H_6)	+20.430
Propano (C_3H_8)	-103.900
Oxigênio (O_2)	0
Nitrogênio (N_2)	0
Monóxido de Carbono (CO)	-110.527
Dióxido de Carbono (CO_2)	-393.522
Vapor D'água	-241.826

Após isso, deve-se realizar o balanço estequiométrico referente à reação de combustão de cada uma das amostras. Foram consideradas, para ambas as amostras, a hipótese de utilização de 1 kmol de gás de síntese. Abaixo podemos ver as reações de combustão, já balanceadas, para cada uma das amostras:

- Combustão do syngas coletado a 670 °C:

$$h_c = \sum N_p \overline{h}_{f,p}^{\circ} - \sum N_r \overline{h}_{f,r}^{\circ} \quad (26)$$

onde $\sum N_p \overline{h}_{f,p}^{\circ}$ é o somatório do produto do número de mols pela entalpia de formação de cada produto e $\sum N_r \overline{h}_{f,r}^{\circ}$ é o somatório do produto do número de mols pela entalpia de formação de cada reagente.

Ademais, foi considerado que os reagentes e os produtos estão no estado de referência padrão de 25 °C e 1 atm e que a água, presente nos reagentes, encontra-se na forma de vapor. Pelos fatos do N_2 e do O_2 serem elementos estáveis, suas entalpias de formação são iguais a zero. No Quadro 9 podem ser vistos os resultados dos cálculos da entalpia de combustão, através da Eq. (26) para cada caso.

Quadro 9: Entalpia de Combustão, Massa Molar e PCI das Amostras.

Syngas	Entalpia de Combustão [kJ/kmol]	Massa Molar [kg/kmol]	PCI [kJ/kg]
Coletado a 670 °C	- 64.075	27,02	2.371
Coletado a 800 °C	- 2.343	28,91	77,59

Além da entalpia de combustão, foram calculadas as massas molares em kg/kmol de cada amostra e também seu PCI em kJ/kg. Pode-se observar que o gás coletado a 670 °C possui um baixo PCI, enquanto o gás coletado a 800 °C apresenta um PCI quase que irrisório.

A razão AC, isto é, a razão ar/combustível da combustão estequiométrica do syngas coletado a 670 °C também foi calculada. Para isso utilizou-se a seguinte equação:

$$AC = \frac{m_{ar}}{m_{comb}} = \frac{(NM)_{ar}}{(NM)_{comb}} \quad (27)$$

onde m_{ar} e m_{comb} são as massas de ar e combustível, em kg, respectivamente, e $(NM)_{ar}$ e $(NM)_{comb}$ são os produtos dos números de mols pelas massas molares do ar e do combustível, respectivamente.

Utilizando os dados do Quadro 9 e da Eq. (24), considerando 1 kmol de gás combustível e que a massa molar do ar é de 29 kg/kmol foi possível determinar a relação ar/combustível para a combustão estequiométrica. O valor da relação AC encontrado foi de 0,1966 kg ar/ kg combustível, ou seja, são necessários 0,1966 kg de ar para a realização da queima de 1 kg do syngas coletado a 670 °C.

3.7) DESEMPENHO DO SYNGAS EM DIFERENTES CICLOS DE POTÊNCIA

Nesta etapa será analisado o desempenho do gás de síntese, coletado a 670 °C, em diferentes ciclos de potência. Não serão feitas análises com o gás de síntese coletado a 800 °C, pois este apresenta um poder calorífico irrisório.

Além disso, nem todos os ciclos de potência apresentados na revisão bibliográfica estarão presentes nesta fase. O ciclo Rankine com reaquecimento, como comentado anteriormente, não apresenta ganho significativo de eficiência em relação ao ciclo Rankine comum e por essa razão também não será analisado.

O ciclo Rankine regenerativo com aquecedor de mistura e com aquecedor de superfície são bastante semelhantes e não apresentam eficiências muito diferentes entre si. Na prática, o aquecedor de mistura é um equipamento mais barato fazendo com que o aquecedor de superfície só seja utilizado em aplicações especiais. Por isso, o ciclo Rankine regenerativo com aquecedor de superfície não será analisado.

Deve-se destacar que a vazão de combustível e a energia mecânica produzida, na forma de trabalho de eixo, por quilograma de syngas requerido foram determinadas pelas Eqs. (28) e (29), respectivamente. Tais equações podem ser vistas a seguir:

$$\dot{Q}_H = \eta_{caldeira/combust\tilde{a}o} \dot{m}_{comb} PCI_{syngas} \quad (28)$$

$$E_{Prod} = \frac{\dot{W}_{ciclo}}{\dot{m}_{comb}} \quad (29)$$

onde, na Eq. (28), Q_H é o calor fornecido ao fluido de trabalho pela caldeira ou pela câmara de combustão, $\eta_{caldeira/combust\tilde{a}o}$ é a eficiência de caldeira ou da câmara de combustão, \dot{m}_{comb} é a vazão de combustível e PCI_{syngas} é o poder calorífico do gás de síntese. Na Eq. (29), E_{Prod} é a energia mecânica produzida por quilograma de syngas requerido e \dot{W}_{ciclo} é o trabalho líquido realizado pelo ciclo, que pode ser determinado através da seguinte expressão:

$$\dot{W}_{ciclo} = \dot{Q}_H - |\dot{Q}_L| \quad (30)$$

onde \dot{Q}_L é o calor retirado do fluido de trabalho no condensador ou perdido para a atmosfera, para o caso de um ciclo a gás.

Além disso, para todos os ciclos a vapor analisados, as eficiências isentrópicas de turbina e bomba/compressor foram consideradas iguais a 0,80. Este valor foi escolhido arbitrariamente a partir de uma ampla faixa de valores, apresentada anteriormente, disponível na literatura. Utilizou-se a Eq. (15) para o cálculo de eficiências térmicas dos ciclos estudados, que foi apresentada, na revisão bibliográfica para o ciclo Rankine mas se aplica a todos os ciclos.

3.7.1) CICLO RANKINE

A Figura 4, apresentada anteriormente, foi utilizada como referência para a construção deste ciclo. Dessa forma, para determinação das propriedades e realização dos cálculos termodinâmicos foram consideradas as seguintes hipóteses:

- Pressão nos estados 2 e 3: 42 bar;
- Pressão nos estados 4 e 1: 0,1 bar;
- Temperatura no estado 1: 420 °C;
- Título no estado 3: 0;
- Vazão de vapor d'água: 5.750 kg/h;
- Eficiência térmica da caldeira: 0,95.

Todos os valores acima, com exceção do título no estado 3 (que corresponde à condição mínima necessária para funcionamento adequado da bomba), foram retirados de catálogos de renomados fabricantes de turbinas e caldeiras. Com base nesses parâmetros e utilizando a Eq. (14), obtiveram-se as seguintes propriedades:

Quadro 10: Propriedades Termodinâmicas - Ciclo Rankine.

Estado	Propriedades Termodinâmicas						
	P_i [bar]	T_i [°C]	x_i	h_i [$\frac{kJ}{kg}$]	s_i [$\frac{kJ}{kgK}$]	h_{i_s} [$\frac{kJ}{kg}$]	s_{i_s} [$\frac{kJ}{kgK}$]
1	0,1	45,81	0	191,8	0,6492	-	-
2	42	46,2	-	197,1	0,6525	196	0,6492
3	42	420	-	3258	6,814	-	-
4	0,1	45,81	0,914	2378	7,504	2158	6,814

Além disso, através da Eq. (14), aplicada aos diferentes equipamentos presentes no ciclo, e das Eqs. (28), (29) e (30) obtiveram-se os valores de outras variáveis de interesse. Tais valores podem ser vistos no Quadro 11.

Quadro 11: Variáveis - Ciclo Rankine.

Variável	Valor
\dot{Q}_H	4.889 kW
\dot{Q}_L	3.492 kW
\dot{W}_B	-8,44 kW
\dot{W}_T	1.406 kW
\dot{W}_{ciclo}	1.397 kW
$\eta_{térmico}$	28,58 %
\dot{m}_{comb}	7,815 ton/h
E_{Prod}	643,7 kJ/kg

3.7.2) CICLO RANKINE REGENERATIVO COM AQUECEDOR DE MISTURA

Para este ciclo, os valores fornecidos pelos fabricantes continuam os mesmos, no entanto, utilizando como referência a Figura 6, os estados termodinâmicos devem ser alterados para que o ciclo possa ser construído. Por causa disso, utilizaram-se as seguintes hipóteses:

- Pressão nos estados 4 e 5: 42 bar;
- Pressão nos estados 2, 3 e 6: 2,5 bar;
- Pressão nos estados 1 e 7: 0,1 bar;
- Temperatura no estado 5: 420 °C;
- Título no estado 1: 0;
- Vazão total de vapor d'água: 5.750 kg/h;
- Vazão de extração (estado 6) de vapor d'água: 600 kg/h.

A vazão de extração de vapor d'água e a pressão no estado 6, que é a pressão do vapor extraído, foram fornecidas pelo fabricante de turbinas. Abaixo podemos ver as propriedades termodinâmicas, calculadas por meio das Eqs. (13) e (14), de cada um dos estados apresentados no ciclo:

Quadro 12: Propriedades Termodinâmicas - Ciclo Rankine Regenerativo Com Aquecedor de Mistura.

Estado	Propriedades Termodinâmicas						
	P_i [bar]	T_i [°C]	x_i	h_i [$\frac{kJ}{kg}$]	s_i [$\frac{kJ}{kgK}$]	h_{i_s} [$\frac{kJ}{kg}$]	s_{i_s} [$\frac{kJ}{kgK}$]
1	0,1	45,81	0	191,8	0,6492	-	-
2	2,5	45,83	-	192,1	0,6494	192	0,6492
3	2,5	109,4	-	458,9	1,412	-	-
4	42	109,9	-	464	1,415	463	1,412
5	42	420	-	3258	6,814	-	-
6	2,5	142,1	-	2749	7,131	2621	6,814
7	0,1	45,81	0,9052	2357	7,438	2259	7,131

Analogamente ao que foi feito para o ciclo Rankine comum, determinaram-se os valores das variáveis de interesse. Estes valores podem ser visualizados no Quadro a seguir:

Quadro 13: Variáveis - Ciclo Rankine.

Variável	Valor
\dot{Q}_H	4.889 kW
\dot{Q}_L	3.492 kW
\dot{W}_{B1}	-0,43 kW
\dot{W}_{B2}	-8,28 kW
\dot{W}_T	1.374 kW
\dot{W}_{ciclo}	1.366 kW
$\eta_{t\acute{e}rmico}$	30,60 %
\dot{m}_{comb}	7,133 ton/h
E_{Prod}	689,2 kJ/kg

Este ciclo, comparado ao anterior, possui maior eficiência e apresenta um valor maior de energia mecânica produzida por quilograma de syngas, ou seja, gasta-se menos combustível para se produzir a mesma quantidade de energia. Isso se deve ao fato de que o calor fornecido ao fluido, neste ciclo, é menor em relação ao calor fornecido ao fluido de um ciclo Rankine comum.

3.7.3) CICLO BRAYTON

Para este ciclo, foram utilizados dados do catálogo de um renomado fabricante de turbinas a gás. Os parâmetros de pressão, temperatura e as eficiências foram ajustados, através da Eq. (14), de modo que os resultados obtidos ficassem coerentes com as informações disponibilizadas no catálogo. Tais informações são:

- Potência elétrica produzida pelo gerador: 33.000 kW;
- Net heat rate: 9.802 kJ/kWh.

Com base nessas informações e utilizando a Figura 8 como referência, obtiveram-se os demais parâmetros. Os valores finais dos parâmetros podem ser vistos abaixo:

- Temperatura e pressões no estado 1: 25 °C e 1 bar;
- Relação/razão de compressão entre os estados 2 e 1: 17;
- Temperatura e pressão no estado 3: 1.195 °C e 17 bar;
- Pressão no estado 4: 1 bar;
- Eficiências isentrópicas da turbina e do compressor: 0,90;
- Eficiência de combustão e do gerador elétrico: 0,90.

O trabalho de eixo líquido gerado pela turbina foi determinado através da razão entre a potência elétrica produzida pelo gerador e a eficiência do gerador. Algumas propriedades termodinâmicas foram calculadas utilizando a Eq. (14), já apresentada e outras determinadas diretamente. Analogamente aos outros ciclos, foram utilizadas as Eqs. (28), (29) e (30). Os resultados podem ser vistos abaixo:

Quadro 14: Propriedades Termodinâmicas - Ciclo Brayton.

Estado	Propriedades Termodinâmicas						
	P_i [bar]	T_i [°C]	h_i [$\frac{kJ}{kg}$]	s_i [$\frac{kJ}{kgK}$]	v_i [$\frac{m^3}{kg}$]	h_{i_s} [$\frac{kJ}{kg}$]	s_{i_s} [$\frac{kJ}{kgK}$]
1	1	25	298,6	5,699	0,8558	-	-
2	17	425,2	711,8	5,76	0,1179	670,4	5,699
3	17	1.195	1598	6,609	0,2479	-	-
4	1	527,4	822,9	6,722	2,298	736,8	6,609

Quadro 15: Variáveis - Ciclo Brayton.

Variável	Valor
\dot{Q}_H	89.847 kW
\dot{Q}_L	-53.181 kW
\dot{W}_C	-41.908 kW
\dot{W}_T	78.575 kW
$\eta_{t\acute{e}rmico}$	40,81 %
\dot{m}_{comb}	151,6 ton/h
E_{Prod}	870,8 kJ/kg

Vale ressaltar que o ciclo Brayton em questão foi modelado como um ciclo padrão a ar, isto é, o fluido de trabalho é uma massa fixa de ar. Após os cálculos, a vazão de ar, que opera no ciclo, foi de 101,4 kg/s ou 365,1 ton/h. Avaliando os dados das Quadros 15 e 16 pode-se chegar a conclusão de que este ciclo possui eficiências maiores do que as dos ciclos anteriores e, além disso, é capaz de produzir mais energia para uma mesma quantidade de combustível.

3.7.4) CICLO BRAYTON COM REGENERAÇÃO

Para a construção deste ciclo utilizou-se como referência a Figura 9. Foi atribuído ao regenerador uma eficiência igual 0,90, expressa pela seguinte equação:

$$\eta_{regenerador} = \frac{h_e - h_s}{h_e - h_{s_s}} \quad (31)$$

Nota-se que a Eq. (31) é semelhante às Eqs. (22) e (23), de eficiências isentrópicas de bomba/compressor e turbina. Os outros parâmetros, fornecidos pelo fabricante e ajustados, continuam os mesmos que os do ciclo Brayton porém alguns destes em diferentes estágios. Tais parâmetros podem ser vistos abaixo:

- Temperatura e pressões no estado 1: 25 °C e 1 bar;
- Relação/razão de compressão entre os estados 2 e 1: 17;
- Pressão no estado x: 17 bar;
- Temperatura e pressão no estado 3: 1.195 °C e 17 bar;
- Pressão nos estados 4 e y: 1 bar.

As propriedades termodinâmicas foram calculadas através da Eq. (14) ou determinadas diretamente. Tais resultados podem ser vistos abaixo:

Quadro 16: Propriedades Termodinâmicas - Ciclo Brayton Com Regeneração.

Estado	Propriedades Termodinâmicas						
	P_i [bar]	T_i [°C]	h_i [$\frac{kJ}{kg}$]	s_i [$\frac{kJ}{kgK}$]	v_i [$\frac{m^3}{kg}$]	h_{i_s} [$\frac{kJ}{kg}$]	s_{i_s} [$\frac{kJ}{kgK}$]
1	1	25	298,6	5,699	0,8558	-	-
2	17	425,2	711,8	5,76	0,1179	670,4	5,699
x	17	517,3	811,8	5,895	0,1335	-	-
3	17	1.195	1.598	6,609	0,2479	-	-
4	1	527,4	822,9	6,722	2,298	736,8	6,609
y	1	435,5	722,9	6,589	2,034	-	-

Quadro 17: Variáveis - Ciclo Brayton Com Regeneração.

Variável	Valor
\dot{Q}_H	79.702 kW
\dot{Q}_L	-43.035 kW
\dot{W}_C	-41.908 kW
\dot{W}_T	78.575 kW
$\eta_{t\acute{e}rmico}$	46 %
\dot{m}_{comb}	134,5 ton/h
E_{Prod}	981,7 kJ/kg

Observando os dados das Quadros 16 e 17, determinados através das Eqs. (28), (29) e (30), pode-se concluir que o regenerador propicia um ganho de eficiência considerável, além disso a energia mecânica produzida pelo eixo da turbina por quilograma de combustível é maior o que significa que este ciclo é mais econômico do que o ciclo Brayton.

Deve-se enfatizar que este ciclo também foi modelado como um ciclo padrão a ar. A massa de ar que percorre os equipamentos é de 101,4 kg/s ou 365,1 ton/h.

3.7.5) CICLO COMBINADO BRAYTON/RANKINE

O ciclo combinado Brayton/Rankine foi modelado com base na Figura 11. Para a modelagem do ciclo Brayton considerou-se um ciclo padrão a ar e utilizou-se os mesmos parâmetros do ciclo Brayton modelado anteriormente. Tais parâmetros podem ser vistos a seguir:

- Temperatura e pressões no estado 1: 25 °C e 1 bar;
- Relação/razão de compressão entre os estados 2 e 1: 17;
- Temperatura e pressões no estado 1: 1.195 °C e 17 bar;

- Pressão no estado 4: 1 bar;
- Temperatura e pressão no estado 5: 200 °C e 1 bar.

Deve-se destacar que as eficiências isentrópicas de compressor e turbina foram consideradas iguais a 0,90 para o ciclo brayton. Isso se dá porque estes valores foram ajustados anteriormente conforme dados fornecidos pelo fabricante de turbinas a gás. Os parâmetros do ciclo Rankine podem ser vistos a seguir:

- Pressão no estado 6: 42 bar;
- Temperatura e pressão no estado 7: 420 °C e 42 bar;
- Pressão no estado 8: 0,1 bar;
- Pressão e título no estado 9: 0,1 bar e 0.

Para o ciclo Rankine, considerou-se eficiências isentrópicas de bomba e turbina iguais a 0,80. A eficiência do ciclo combinado é calculada utilizando-se a Eq. (15), porém o termo \dot{W}_{ciclo} corresponderá à soma do trabalho líquido realizado pela turbina de cada ciclo. Por meio das Eqs. (14), (28), (29) e (30), obtiveram-se os resultados a seguir:

Quadro 18: Propriedades Termodinâmicas - Parte Brayton do Ciclo Combinado Brayton/Rankine.

Estado	Propriedades Termodinâmicas						
	P_i [bar]	T_i [°C]	h_i [$\frac{kJ}{kg}$]	s_i [$\frac{kJ}{kgK}$]	v_i [$\frac{m^3}{kg}$]	h_{i_s} [$\frac{kJ}{kg}$]	s_{i_s} [$\frac{kJ}{kgK}$]
1	1	25	298,6	5,699	0,8558	-	-
2	17	425,2	711,8	5,76	0,1179	670,4	5,699
3	17	1195	1.598	6,609	0,2479	-	-
4	1	527,4	822,9	6,722	2,298	736,8	6,609
5	1	200	475,8	6,166	1,358	-	-

Quadro 19: Variáveis - Parte Brayton do Ciclo Combinado Brayton/Rankine.

Variável	Valor
\dot{Q}_H	105.636 kW
\dot{Q}_L	-21.131 kW
\dot{W}_C	-49.273 kW
\dot{W}_T	92.383 kW

Quadro 20: Propriedades Termodinâmicas - Parte Rankine do Ciclo Combinado Brayton/Rankine.

Estado	Propriedades Termodinâmicas						
	P_i [bar]	T_i [°C]	x_i	h_i [$\frac{kJ}{kg}$]	s_i [$\frac{kJ}{kgK}$]	h_{i_s} [$\frac{kJ}{kg}$]	s_{i_s} [$\frac{kJ}{kgK}$]
6	42	46,2	-	197,1	0,6525	196	0,6492
7	42	420	-	3.258	6,814	-	-
8	0,1	45,81	0,914	2.378	7,504	2158	6,814
9	0,1	45,81	0	191,8	0,6492	-	-

Quadro 21: Variáveis - Parte Rankine do Ciclo Combinado Brayton/Rankine.

Variável	Valor
\dot{Q}_L	-29.566 kW
\dot{W}_B	-71,49 kW
\dot{W}_T	11.901 kW
\dot{m}_{comb}	7,815 ton/h

Para o ciclo Brayton a vazão de ar, calculada, foi de 119,3 kg/s ou 429,3 ton/h. Além disso, o trabalho líquido gerado pela turbina a gás é de 43.110 kW. Enquanto que para o ciclo Rankine a vazão de vapor, calculada, foi de 13,52 kg/s ou 48,68 ton/h. Além disso, o trabalho líquido gerado pela turbina a vapor é de 11.830 kW.

A eficiência térmica do ciclo combinado foi de 52,01 %, que é um valor mais expressivo do que as eficiências encontradas nos ciclos anteriores. Este ciclo também gera mais trabalho líquido no eixo da turbina por quilograma de combustível, tal valor foi estimado, através da Eq. (29), em 2134 kJ/kg.

3.7.6) CICLO OTTO

Para a construção do ciclo Otto utilizou-se como referência os diagramas apresentados na Figura 10. Além disso, foi utilizado um catálogo de um famoso fabricante de motores de ignição por centelha usados para geração de energia a partir de gás natural e biogás. Os parâmetros fornecidos pelos fabricantes podem ser vistos abaixo:

- Curso do pistão do motor: 0,185 m;
- Diâmetro do pistão do motor: 0,145 m;
- Número de cilindros do motor: 20;
- Rotação do motor: 1.800 rpm;
- Potência elétrica gerada pelo motor: 1.421 kW;
- Rotação do motor: 1.800 rpm;
- Temperatura de exaustão: 180 °C;

- Eficiência do motor: 0,402 rpm.

Além dos parâmetros apresentados acima, estabeleceu-se algumas hipóteses para a construção do ciclo. Tais hipóteses podem ser vistas a seguir:

- Relação de compressão: 8;
- Temperatura e pressão no estado 1 (admissão): 25 °C e 250 kPa;
- Temperatura no estado 4 (exaustão): 525 °C;
- Eficiências de combustão: 0,9.

Vale ressaltar que apesar do fabricante indicar uma temperatura de exaustão igual a 180 °C este valor não pôde ser utilizado devido a falta de mais informações no catálogo. Para que os resultados obtidos ficassem mais coerentes com a realidade supôs-se uma temperatura de exaustão igual a 525 °C, este valor foi escolhido com base no valor de temperatura de exaustão calculado para o ciclo Brayton.

Além disso, o ciclo Otto ideal é constituído de dois processos de expansão e compressão isentrópicos. Novamente, para que os resultados ficassem mais coerentes somente a compressão foi considerada isentrópica. As equações utilizadas, para realização dos cálculos, podem ser vistas abaixo:

$$\eta_{motor} = \frac{\dot{W}_{elétrica}}{\dot{W}_{total}} \quad (32)$$

onde η_{motor} é a eficiência do motor, fornecida pelo fabricante, $\dot{W}_{elétrica}$ é a potência elétrica gerada pelo motor e \dot{W}_{total} é o trabalho de eixo gerado por todos os cilindros do motor.

$$V_d = \pi A_{cilindro} s_{pistão} = V_{máx} - V_{mín} \quad (33)$$

onde V_d é o volume deslocado em um cilindro, $A_{cilindro}$ é a área do pistão de cada cilindro e $s_{pistão}$ é o curso do pistão.

$$\dot{W}_{total} = V_t PME n \quad (34)$$

onde V_t é o volume total do motor, dado pelo produto do volume deslocado V_d pelo número de cilindros, PME é a pressão média efetiva do motor e n é a rotação do motor.

$$W_{líquido} = PME (V_{máx} - V_{mín}) \quad (35)$$

onde $W_{líquido}$ é o trabalho mecânico gerado em um cilindro.

$$Q_{H/L} + u_e = u_s \quad (36)$$

onde $Q_{H/L}$ representa os calores fornecido ou retirado, u_e é a energia interna de entrada e u_s é a energia interna de saída.

$$m_{ar} = \frac{V_{máx}}{v_1} \quad (37)$$

onde m_{ar} é a massa de ar contida por um cilindro e v_1 é o volume específico no estado termodinâmico 1.

$$\eta_{t\acute{e}rmico} = \frac{W_{líquido}}{(m Q_H)} \quad (38)$$

$$Q_H = \eta_{combust\acute{a}o} m_{comb} PCI_{syngas} \quad (39)$$

onde Q_H é o calor fornecido ao ar pelo combustível em um cilindro e m_{comb} é a massa de combustível necessária para geração de tal calor.

$$E_{Prod} = \frac{\dot{W}_{total}}{N m_{comb}} \quad (40)$$

onde N é o número de cilindros do motor.

Dessa forma, determinaram-se diretamente, por meio dos dados fornecidos pelo fabricante e hipóteses adotadas, e calcularam-se, através das Eqs. (32) a (40), as propriedades termodinâmicas em cada estado. Tais resultados podem ser vistos no Quadro 22.

O ciclo Otto foi o ciclo que apresentou maior eficiência, porém alguns valores que precisaram ser usados nos cálculos são bastante irrealistas. Além disso, a rigor o ciclo Otto deveria ter dois processos isentrópicos, porém apenas um dos processos pôde ser considerado como isentrópico. A energia mecânica gerada por quilograma de gás de síntese gerada foi calculada através da Eq. (40) e apresentou o menor valor encontrado dentre todos os ciclos, conforme pode-se ver no Quadro 23.

Quadro 22: Propriedades Termodinâmicas - Ciclo Otto.

Estado	Propriedades Termodinâmicas				
	P_i [kPa]	T_i [°C]	u_i [$\frac{kJ}{kg}$]	s_i [$\frac{kJ}{kgK}$]	v_i [$\frac{m^3}{kg}$]
1	250	25	213	5,436	0,3423
2	4.491	396,4	488,8	5,436	0,04279
3	11.776	1.482	1445	6,271	0,04279
4	669,3	525	591,1	6,173	0,3423

Quadro 23: Variáveis - Ciclo Otto.

Variável	Valor
V_d	0,003055 m ³
V_t	0,0611 m ³
$V_{máx}$	0,003491 m ³
$V_{mín}$	0,0004364 m ³
Q_H	955,8 kJ/kg
Q_L	-378,1 kJ/kg
PME	1.928 kPa
$W_{líquido}$	5,891 kJ
m	0,0102 kg
m_{comb}	0,4479 kg
$\eta_{térmico}$	60,44 %
E_{Prod}	394,6 kJ/kg

4) CONCLUSÃO

Este trabalho pode ser resumido em duas etapas, sendo estas a caracterização do gás de síntese e a aplicação deste em diferentes ciclos de potência. Chegou-se à conclusão de que o gás de síntese coletado a 800 °C não é viável para ser usado em nenhum ciclo devido ao seu baixíssimo PCI. Por outro lado, o syngas coletado a 670 °C possui um PCI maior e pôde ser testado em vários ciclos de potência.

Os PCI's dos gases coletados a 800 °C e 670 °C foram de 77,59 kJ/kg e 2.371 kJ/kg, respectivamente. O gás coletado a 800 °C possui, em sua composição, uma grande quantidade de oxigênio e nitrogênio fazendo com que a combustão estequiométrica aconteça sem a necessidade de adição de ar atmosférico nos reagentes e com oxigênio e nitrogênio remanescentes nos produtos. Além disso, apesar do PCI do gás de síntese coletado a 670 °C ser maior do que o do gás coletado a 800 °C, esse valor é pequeno quando comparado com o poder calorífico médio, em base úmida, do cigarro triturado, encontrado através do ensaio de calorimetria, que foi de 15.548 kJ/kg.

Dentre os ciclos testados o que apresentou maior eficiência, com um valor igual a 60,44 %, foi o ciclo Otto. No entanto, quando avaliada a energia mecânica produzida por quilograma de syngas este ciclo foi o que teve o pior desempenho, com um valor de 394,6 kJ/kg. O ciclo combinado Brayton/Rankine é o mais promissor pois, além de possuir uma eficiência térmica combinada de 52,01 %, produz a maior quantidade de energia mecânica por quilograma de gás de síntese requerido, com um valor de 2.134 kJ/kg.

O ciclo com menor rendimento térmico foi o ciclo Rankine, apresentando um valor igual a 28,58 %. A energia mecânica produzida por quilograma de syngas para este ciclo é de 643,7 kJ/kg. Os demais ciclos apresentaram valores de eficiências intermediárias, isto é, eficiências com valores localizados entre a eficiência calculada para o ciclo Rankine e ciclo Otto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, Antônia F. V. **Química: Métodos Cromatográficos**. 1ª Edição. Fortaleza: Ed UECE, 2019.

ASTM E1131-08, "Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry", ASTM International, 2014.

BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 8ª Edição. São Paulo: Blucher, 2018.

CHEMÉO. **Cheméo - High Quality Chemical Properties**. Disponível em: <<https://www.chemeo.com/>>. Acesso em: 04 de Fevereiro de 2023.

CORTEZ, Luís A. B.; LORA, Electo E. S.; GÓMEZ, Edgardo O. **BIOMASSA para energia**. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2008.

ÇENGEL, Yunnus A.; BOLES, Michael A. **TERMODINÂMICA**. 7ª Edição. Porto Alegre: AMGH, 2013.

DA CUNHA, C.F.R; GOES, L.F.M. **ENSAIOS DE CALORIMETRIA E ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA EM AMOSTRAS ALEATÓRIAS E DESCONHECIDAS**. 2022. 37p. Projeto de Fim de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

EICHLER, Paulo et al. **PRODUÇÃO DO BIOMETANOL VIA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA**. 8 p. Química Nova, Vol. 28, Nº 6, 2015.

FERREIRA, C. R. N. **Projeto de linha industrial para o processamento de resíduos sólidos urbanos e produção de combustível derivado de resíduos para a gaseificação em reator termoquímico: análise experimental do syngas para a produção de energia térmica e elétrica**. 2021. 120 p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

FÓRUM NACIONAL CONTRA A PIRATARIA E A ILEGALIDADE. **Fórum Nacional Contra a Pirataria e a Ilegalidade**. Disponível em: <<https://fncp.org.br/>>. Acesso em: 04 de Fevereiro de 2023.

Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais** / Fundação Estadual do Meio Ambiente - Belo Horizonte: FEAM/2012. 163 p. il.

Gehm, Sandi da Costa **AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS** / Sandi da Costa Gehm.- 2019. 90 p.

GENERAL ELECTRIC. **GE Gas Power**. Disponível em: <<https://www.ge.com/gas-power>>. Acesso em: 04 de Fevereiro de 2023.

JENKINS, B. M. **Fuel properties for biomassa materials**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLICATION AN MANAGEMENT OF ENERGY IN AGRICULTURE: THE ROLE BIOMASS FUELS, 1., 1990, New Delhi. Proceedings ... Ludhiana: Punjab Agricultural University, 1990. p. 21-23.

KARATEPE, N.; KUÇUKBAYRAK, S. **Proximate analysis of some Turkish lignites by thermogravimetry**. Thermochemica Acta, v. 213, n. C, p. 147–150, 1993.

LEME, M. M. V. (2010), **Avaliação das Opções Tecnológicas para geração de energia através dos Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso** , 123p Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia - Universidade Federal de Itajubá).

MINISTÉRIO DA ECONOMIA. **Receita Federal**. Disponível em: <<https://www.gov.br/receitafederal/pt-br>>. Acesso em: 04 de Fevereiro de 2023.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Instituto Nacional de Câncer - INCA**. Disponível em: <<https://www.gov.br/inca/pt-br>>. Acesso em: 04 de Fevereiro de 2023.

MONARCHA, Maria Eduarda. SILVA, M.F. **A indústria de cigarros e os efeitos do mercado ilegal**. Rio de Janeiro, 2019.

MONTEIRO, V. A. L. **Modelagem Termodinâmica de Gás de Síntese de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos com Simulações em Ciclos de Potência a Gás e Vapor**. 2019. 129 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

MOTHÉ, Cheila G.; AZEVEDO, Aline D. **ANÁLISE TÉRMICA DE MATERIAIS**. São Paulo: Artliber, 2009.

NASCIMENTO, Ronaldo F. et al. **Cromatografia gasosa: aspectos teóricos e práticos**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2018.

PAVAN, M.C.O. **Geração de Energia a Partir de Resíduos Sólidos Urbanos: Avaliação e Diretrizes para Tecnologias Potencialmente Aplicáveis no Brasil**, 2010, 186 f.. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PESSOA FILHO, J. S. **ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA DE BRIQUETES DE CAPIM BRAQUIÁRIA**. 2013. 85 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SANTOS, L. R. O. **Análise da Eficiência Energética das Biomassas utilizadas em Fornos Cerâmicos na Região de Tatuí-SP**. 2015. 68p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Centro de Ciências e Tecnologias para Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba 2015.

SKOOG, Douglas A.; HOLLER, F. James; NIEMAN, Timothy A. **Princípios de análise instrumental**. 5ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2002.

TEXAS INDUSTRIAL. **Texas Industrial**. Disponível em: <<https://www.texas.com.br/>>. Acesso em: 04 de Fevereiro de 2023.

UNAFISCO NACIONAL. **NOTA TÉCNICA N.º 25/2022 – CONTRABANDÔMETRO: O COMBATE AO CONTRABANDO E DESCAMINHO PELA ADUANA BRASILEIRA.** UNAFISCO, 2022.

U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE. **NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS OF AND TECHNOLOGY - NIST.** Disponível em: <<https://www.nist.gov/>>. Acesso em: 04 de Fevereiro de 2023.

YUMPU. **Type 4 Gas Engines Brochures (English Version) PDF - GE Energy.** Disponível em: <<https://www.yumpu.com/en/document/view/21383842/type-4-gas-engines-brochure-english-version-pdf-ge-energy>>. Acesso em: 04 de Fevereiro de 2023.