

REGINA FRANCIÉLLE SILVA PAULINO

Modelagem para dimensionamento de gaseificador a plasma: aspectos técnicos e econômicos

Regina Francielle Silva Paulino

Modelagem para dimensionamento de gaseificador a plasma: aspectos técnicos e econômicos

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Mecânica na área de Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira
Coorientador: Prof. Dr. Alexei Mikhailovich Essiptchouk

Guaratinguetá - SP
2021

P328m Paulino, Regina Franciélle Silva
Modelagem para dimensionamento de gaseificador a plasma : aspectos técnicos e econômicos / Regina Franciélle Silva Paulino. – Guaratinguetá, 2021.
148 f : il.
Bibliografia: f. 139-148

Tese (Doutorado) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

Coorientador: Prof. Dr. Alexei Mikhailovich Essiptchouk

1. Gases em plasma. 2. Gaseificação de biomassa. 3. Termodinâmica. I. Título.

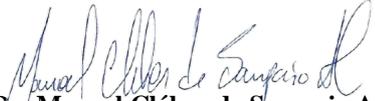
CDU 533.9(043)

REGINA FRANCIELLE SILVA PAULINO

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTORA EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: DOUTORADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSE LUZ SILVEIRA
Orientador - UNESP
participou por videoconferência


Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
UNESP
participou por videoconferência


Prof. Dr. AGNELO MAROTTA CASSULA
UNESP
participou por videoconferência


Prof. Dr. NESTOR PROENZA PÉREZ
CEFET/RJ
participou por videoconferência


Prof. Dr. CHRISTIAN J. R. CORONADO
UNIFEI
participou por videoconferência

DADOS CURRICULARES

REGINA FRANCIÉLLE SILVA PAULINO

NASCIMENTO	28.04.1989 – IGUATEMI / MS
FILIAÇÃO	José Maria Paulino Maria da Conceição Silva Paulino
2009/2014	Graduação em Engenharia Mecânica FEG-UNESP
2015/2017	Mestrado em Engenharia Mecânica FEG-UNESP

*A toda minha família, namorado e amigos, em
especial meu pai José Maria Paulino e minha
mãe Maria Conceição Silva Paulino*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, primeiramente, que me abençoou e iluminou o meu caminho para que pudesse cumprir com meus objetivos e sonhos.

Agradeço aos meus pais José Maria Paulino e Maria Conceição Silva Paulino, por sempre me incentivarem, por ter dado todo apoio e carinho, pelas orações, e por sempre estarem muito presentes na minha vida. Esse doutorado é de vocês.

Aos meus irmãos Reginaldo Silva Paulino e Renivaldo Silva Paulino, por sempre me apoiarem, torcerem e incentivarem nos momentos de precisão e pela amizade e irmandade. A todos os familiares que de uma forma ou outra estiveram presente na minha vida em todas as etapas de minha formação..

Ao meu namorado Guilherme Lemos, que me deu muito carinho, conforto e força na reta final do doutorado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Luz Silveira, e co-orientado, Alexei Mikhailovich Essiptchouk, pelo incentivo, apoio, orientação e amizade para que esta tese fosse finalizada.

A todos amigos do LOSE, IPBEN que de alguma forma colaboraram para que minha pesquisa fosse concluída, que com certeza serão para toda vida.

A todos amigos, funcionários e professores da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá –UNESP que foram providenciais para a minha formação.

E por fim, a todas as pessoas que de certa forma colaboraram para o meu sucesso.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

“Tente uma, duas, três vezes e se possível tente a quarta, a quinta e quantas vezes for necessário. Só não desista nas primeiras tentativas, a persistência é amiga da conquista. Se você quer chegar onde a maioria não chega, faça o que a maioria não faz.”

Bill Gates

RESUMO

A tecnologia de gaseificação a plasma é ecologicamente correta e pode ser aplicada para processar resíduos sólidos municipais, comerciais, industriais, petroquímicos e do serviço de saúde. Esta é ainda uma tecnologia pouco difundida porque apresenta elevados consumo de eletricidade e custo econômico, mas pode ser uma alternativa para o processamento de resíduos sólidos do serviço de saúde (RSS) devido ao fato de permitir tratamento adequado. O processo produz gás de síntese que pode ser utilizado para geração de energia térmica e/ou elétrica. Tendo em vista que o Brasil tem sérios problemas com o descarte incorreto dos RSS e também pelo aumento da geração deste tipo de resíduo devido a pandemia Covid-19, faz-se necessário a ampliação a aprofundamento de estudos da tecnologia de gaseificação a plasma para o processamento e eliminação do RSS das cidades brasileiras. Neste trabalho de tese é desenvolvido uma metodologia que apresenta uma sequência de procedimentos para o dimensionamento de gaseificador a plasma. São efetuados estudos termodinâmicos para determinação do potencial de geração de energia elétrica em motor de combustão interna (MCI) e em um conjunto turbina a gás (CTG), operando com gás de síntese produzido pelo sistema de gaseificação a plasma. São ainda determinados os níveis de eficiências energéticas e exergéticas do sistemas propostos. Também são realizados estudos de engenharia econômica para a determinação dos custos da produção de gás de síntese e de eletricidade (US\$/kWh); também são determinados a receita anual e o *payback*. Os estudos termodinâmicos e econômicos são aplicados para analisar o caso considerando o processamento de resíduos sólidos do serviço de saúde produzido na cidade de São Paulo, Brasil, de acordo com os dados de disponibilidade de RSS em 2020, que apresentou crescimento considerável na produção deste tipo de resíduo, como já mencionado, devido a pandemia Covid-19. Conclui-se que é possível determinar dimensões importantes do gaseificador a plasma a partir do melhor ponto de operação e do tempo de destruição do RSS. Conclui-se ainda, que é possível dar tratamento final e uso energético aos RSS utilizando gaseificador a plasma com tocha de arco transferido. Dos estudos termodinâmicos e econômicos têm-se que o processo de gaseificação a plasma é promissor quando associado com MCI ou CTG, para a capacidade de 36872 t/ano de RSS é possível produzir 2772,54 e 3741,63 kW, respectivamente, e apresentando *payback* similares de 4 a 8 anos, quando comparado com os processos tradicionais de autoclavagem e incineração, respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: Gaseificação a plasma. Dimensionamento. Resíduos sólidos de saúde. Análise termodinâmica. Análise econômica.

ABSTRACT

Plasma gasification technology is environmentally friendly and can be applied to process solid municipal, commercial, industrial, petrochemical and biomedical waste. This is still a little-known technology because it has high electricity consumption and economic cost, but it can be an alternative for the processing of biomedical waste (BW) due to the fact that it allows for adequate treatment. The process produces and syngas that can be used to generate thermal and/or electrical energy. Considering that Brazil has serious problems with the incorrect disposal of BW and also the increase in the generation of this type of waste due to the Covid-19 pandemic, it is necessary to expand and deepen studies of plasma gasification technology for the processing and elimination of BW from Brazilian cities. In this thesis work, a methodology is developed that presents a sequence of procedures for the design of a plasma gasifier. Thermodynamic studies are carried out to determine the potential of electrical energy generation in an internal combustion engine (ICE) and in a gas turbine set (GTS), operating with syngas produced by the plasma gasification system. The levels of energy and exergetic efficiencies of the proposed systems are also determined. Economic engineering studies are also carried out to determine the costs of production of gas (syngas) and electricity (US\$/kWh); Annual revenue and payback are also determined. Thermodynamic and economic studies are applied to analyze the case considering the processing of biomedical waste produced in the city of São Paulo, Brazil, according to BW availability data in 2020, which showed considerable growth in its production type of waste, as already mentioned, due to the Covid-19 pandemic. It is concluded that it is possible to determine important dimensions of the plasma gasifier from the best operating point and destruction time of the BW. It is also concluded that it is possible to give final treatment and energy use to the BW using plasma gasifier with transferred arc torch. From thermodynamic and economic studies, the plasma gasification process is shown to be promising when associated with ICE or SGT for a capacity of 36872 t/year of RSS it is possible to produce 2772.54 and 3741.63 kW, respectively, and presenting similar paybacks of 4 to 8 years, when compared to traditional autoclaving and incineration processes, respectively.

KEYWORDS: Plasma gasification. Plasma gasifier. Biomedical waste. Thermodynamic analysis. Economic analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo utilizados para o descarte dos RSS coletados nas cidades brasileiras	27
Figura 2: a) Arco não transferido; b) Arco transferido.....	35
Figura 3 – Gaseificador a plasma	37
Figura 4 – Croqui do gaseificador a plasma	51
Figura 5 – Sistema de isolamento térmico do gaseificador a plasma.....	59
Figura 6 – Fluxograma do Sistema gaseificador a plasma associado ao motor de combustão interna.....	62
Figura 7 – Fluxograma do Sistema gaseificador a plasma associado ao conjunto turbina a gás	63
Figura 8 – Trocador de calor e sistema de limpeza	66
Figura 9 – Turbina a gás	72
Figura 10 – Compressor de ar.....	74
Figura 11 – Compressor de gás	75
Figura 12 – Gaseificador a plasma	80
Figura 13 – Trocador de calor	82
Figura 14 – Motor de combustão interna	83
Figura 15 – Compressor de gás da configuração 2.....	84
Figura 16 – Compressor de ar da configuração 2	85
Figura 17 – Câmara de combustão da configuração 2.....	86
Figura 18 – Turbina a gás da configuração 2	87
Figura 19: Metodologia para determinação do custo de investimento do sistema de gaseificação a plasma	94
Figura 20: Metodologia para determinação do custo de investimento do sistema de limpeza	96
Figura 21 – Fluxograma do caminho percorrido pelo RSS da coleta até o aterro sanitário ...	101
Figura 22 – Fração de massa, % wt, de espécies no gás produzido de tratamento RSS	105
Figura 23 – Fração de volume, % vol, de espécies no gás produzido de tratamento de RSS	105
Figura 24 – Variação da matéria condensada no processamento de RSS	107
Figura 25 – Variação do rendimento energético do gás de síntese em função da temperatura	108
Figura 26: (a) Gaseificador a plasma dimensionado para 2TPD e (b) Gaseificador a plasma para 2 TPD proposto por Erdogam et al. (2021)	112
Figura 27 : vistas do gaseificador a plasma de 25 TPD.....	115

Figura 28 – Potência elétrica produzida e requerida no sistema de gaseificação.....	119
Figura 29 – Porcentagem de eletricidade que o motor de combustão interna e conjunto turbina a gás consegue suprir a demanda da tocha a plasma	119
Figura 30: Diagrama de Sankey para a gaseificação a plasma associado ao MCI.....	121
Figura 31: Diagrama de Sankey para a gaseificação a plasma associado ao CTG	122
Figura 32 – Irreversibilidades – Configuração 1	125
Figura 33 – Irreversibilidades – Configuração 2	125
Figura 34 – Diagrama de Grassmann para a gaseificação a plasma associado ao MCI.....	127
Figura 35 – Diagrama de Grassmann para a gaseificação a plasma associado ao CTG	128
Figura 36 – Custo de produção de gás – Conf. 1.....	129
Figura 37 – Custo de produção de gás – Conf. 2.....	130
Figura 38 – Comparação do custo de produção de gás entre Conf. 1 e 2.....	130
Figura 39 – Custo de produção de eletricidade – Conf. 1	131
Figura 40 – Custo de produção de eletricidade – Conf. 2	132
Figura 41 – Comparação do custo de produção de eletricidade entre Conf. 1 e 2	132
Figura 42 – Receita anual, conf. 1 (autoclave)	133
Figura 43 – Receita anual, conf. 1 (incineração).....	134
Figura 44 – Receita anual, conf. 2 (autoclave)	134
Figura 45 – Receita anual, conf. 2 (incineração).....	135
Figura 46 – Receita anual, comparação entre conf. 1 e 2, considerando autoclave e incineração	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diferenças entre tochas de CC e CA	34
Tabela 2 – Instalações de tratamento de plasma térmico e processos em escala de laboratório para resíduos médicos.....	42
Tabela 3 – Composição química de TO e RD, wt.%.....	46
Tabela 4 – Concentração de gases, vol%.....	46
Tabela 5 – Composição elementar do RSS do Brasil (%).....	47
Tabela 6 – Dados de saco de lixo hospitalar.....	54
Tabela 7 – Coeficientes de aproximação polinomial.....	67
Tabela 8 – Tabela da constante dos gases.....	73
Tabela 9 – Exergia química.....	79
Tabela 10 – Produção de RSS (toneladas) - pequenos geradores.....	100
Tabela 11 – Produção de RSS (toneladas) - grandes geradores.....	100
Tabela 12 – Produção diária de RSS - Pequenos geradores de RSS.....	102
Tabela 13 – Produção diária de RSS - Grandes geradores de RSS.....	102
Tabela 14 – TRSS para pequenos geradores de RSS.....	102
Tabela 15 – TRSS para grandes geradores de RSS.....	103
Tabela 16 – TRSS para pequenos geradores de RSS.....	103
Tabela 17 – TRSS para grandes geradores de RSS.....	103
Tabela 18 – Fração mássica dos elementos que compõe o gás produzido na gaseificação de plasma de RSS.....	109
Tabela 19 – Porcentagem em volume dos elementos que compõe o gás produzido na gaseificação de plasma de RSS.....	109
Tabela 20 – Comparação da composição do gás de síntese em % vol.....	109
Tabela 21 – Parâmetros para o dimensionamento do gaseificador para 2 TPD.....	110
Tabela 22 – Principais dimensões do gaseificador a plasma para 2 TPD.....	111
Tabela 23 – Parâmetros para o dimensionamento do gaseificador para 25 TPD.....	113
Tabela 24 – Principais dimensões do gaseificador a plasma para 25 TPD.....	114
Tabela 25 – Propriedades termodinâmicas da gaseificação a plasma de RSS associado ao MCI.....	116
Tabela 26 – Propriedades termodinâmicas da gaseificação a plasma de RSS associado ao CTG.....	117
Tabela 27 – Equipamentos selecionados.....	117

Tabela 28 – Propriedades gerais da análise termodinâmica.....	118
Tabela 29 – Exergias da configuração 1 e 2.....	123
Tabela 30 – Eficiências exergéticas – Configuração 1.....	124
Tabela 31 – Eficiências exergéticas – Configuração 2.....	124

LISTA DE SÍMBOLOS

$PCI_{gás}$: poder calorífico inferior do gás [kJ/kg]

α : rendimento da energia do gás [-]

ΔH : diferença de entalpia [kJ/kg], i.e. a energia necessária para aquecimento de 1 kg de RSS do estado inicial até o final

PCI_i : poder calorífico inferior do i-ésimo componente [kJ/kg]

X_i : fração mássica do i-ésimo componente [-]

E_{tocha} : potência elétrica da tocha [kW]

\dot{m}_{RSS} : fluxo mássico de RSS [kg/s]

$E_{tocha.unit}$: potência elétrica em cada tocha [kW]

N_{tocha} : número de tochas [-]

A_t : área da tampa do gaseificador [m²]

CP_{RSS} : capacidade de processamento do RSS [kg/s]

\dot{m}_{RSS} : fluxo mássico de RSS [kg/s]

V_{RSS} : velocidade do RSS [m/s]

ρ_{RSS} : massa específica de RSS [kg/m³]

H_i : altura interna do gaseificador [m]

t_r : tempo de residência do RSS no gaseificador [s]

V_{RSS} : velocidade do RSS [m/s]

D_i : diâmetro interno do gaseificador a plasma [m]

$m_{RSS.s}$: massa de RSS por saco [kg]

$\forall_{RSS.c}$: volume do saco de RSS compactado [m³]

d_1 : diâmetro de entrada de RSS [m]

h_{RSS} : altura do saco de RSS [m]

$h_{RSS.c}$: altura do saco de RSS compactado [m]

FS : fator de segurança [-]

$N_{saco.RSS}$: número máximo de entradas de sacos de RSS [-]

\dot{m}_{cinzas} : fluxo mássico de cinzas [kg/s]

V_{cinzas} : velocidade de escoamento de cinzas [m/s]

ρ_{cinzas} : massa específica das cinzas [kg/m³]

d_3 : diâmetro de saída do gás [m]

$\dot{m}_{gás}$: fluxo mássico de gás [kg/s]

$V_{gás}$: velocidade do gás [m/s]
 $\rho_{gás}$: massa específica do gás [kg/m³]
 $v_{gás}$: volume específico do gás [m³/kg]
 e_a : espessura do aço inox [m]
 e_i : espessura do material isolante [m]
 e_m : espessura da manta térmica [m]
 $h_{1.conv}$: coeficiente de convecção do plasma [W/m².K]
 $h_{4.conv}$: coeficiente de convecção livre do ar [W/m².K]
 k_a : condutividade térmica do aço inox [W/m.K]
 k_i : condutividade térmica do material isolante [W/m.K]
 k_m : condutividade térmica da manta [W/m.K]
 $T_{\infty,1}$: temperatura que o plasma atinge no interior do reator [K]
 $T_{\infty,4}$: temperatura do ar externo [K]
 D_{total} : Diâmetro total do gaseificador [m]
 H_{total} : altura total do gaseificador [m]
 $\dot{m}_{oxidante} = \dot{m}_2$: fluxo mássico de oxidante [kg/s]
 $\dot{m}_{outros.gases}$: fluxo mássico de outros gases que compõe o gás [kg/s]
 \dot{m}_{syngas} : fluxo mássico de gás de syngas [kg/s]
 PCI_{RSS} : Poder calorífico inferior do RSS [kJ/kg]
 X_C : fração mássica de carbono [-]
 X_H : fração mássica de hidrogênio [-]
 X_{H_2O} : fração mássica de água [-]
 X_N : fração mássica de nitrogênio [-]
 X_O : fração mássica de oxigênio [-]
 X_S : fração mássica de enxofre [-]
 PCI_{RSS} : poder calorífico inferior do RSS [kJ/kg]
 η_{gp} : eficiência energética do gaseificador a plasma [-]
 $c_{pm.gás}$: calor específico médio a pressão constante do gás [kJ/kg.K]
 \dot{m}_4 : fluxo mássico no ponto 4 do gaseificador a plasma [kg/s]
 $Q_{gás}$: fluxo de calor produzido no trocador de calor pelo gás [kW]
 T_4 : temperatura do gás no ponto 4 [K]
 T_5 : temperatura do gás no ponto 5 [K]
 $c_{p.gás}$: calor específico do gás a pressão constante [kJ/kg.K]

$c_{p.gás(T_4)}$: calor específico do gás a pressão constante na temperatura do ponto 4 [kJ/kg.K]

$c_{p.gás(T_5)}$: calor específico do gás a pressão constante na temperatura do ponto 5 [kJ/kg.K]

c_{pi} : calor específico a pressão constante do componente i do gás [kJ/kg.K]

$c_{pm.gás}$: calor específico médio a pressão constante do gás [kJ/kg.K]

X_i : fração mássica do componente i do gás [-]

P_4 : pressão do gás no ponto 4 [kPa]

P_5 : pressão do gás no ponto 5 [kPa]

P_6 : pressão do gás no ponto 6 [kPa]

ΔP_{TC} : perda de carga no trocador de calor [-]

ΔP_{SL} : perda de carga no sistema de limpeza [-]

$\dot{E}_{p.MCI}$: potência elétrica do MCI [kW]

$\eta_{el.MCI}$: eficiência de geração de eletricidade do MCI [kW]

γ_{PCI} : fator de correção do PCI [-]

η_{gp} : eficiência do gaseificador a plasma [-]

$\eta_{gp.el.MCI}$: eficiência energética do processo de gaseificação a plasma associado ao MCI [-]

$\Omega_{el.MCI}$: Porcentagem de eletricidade que o MCI pode suprir no gaseificador a plasma [%]

$\eta_{el.TG}$: eficiência de geração de eletricidade da turbina a gás [-]

c_{pG} : calor específico a pressão constante do gás de exaustão [kJ/kg.K]

R_G : constante dos gases para o gás de exaustão [kJ/kg.K]

RP : razão de pressão [-]

T_{10} : temperatura no ponto 10 da TG [K]

T_{11} : temperatura no ponto 11 da TG [K]

λ_G : relação entre calor específico a pressão constante e calor específico a volume constante [-]

η_{isoTG} : eficiência isoentrópica da turbina a gás [0,89 (VILLELA, 2007)]

T_8 : temperatura do ar no ponto 8 do compressor [K]

T_9 : temperatura do ar no ponto 9 do compressor [K]

P_7 : Pressão do ar ponto 7 do compressor [kPa]

P_8 : Pressão do ar ponto 8 do compressor [kPa]

η_{isoc} : eficiência isoentrópica do compressor [80%] (VILLELA, 2007)

λ_{ar} : relação entre calor específico a pressão constante e calor específico a volume constante do ar [kJ/kg.K].

T_6 : temperatura do gás (syngas) no ponto 6 do compressor a gás [K]

T_7 : temperatura do gás (syngas) no ponto 7 do compressor a gás [K]
 P_6 : pressão do gás no ponto 6 do compressor de gás [kPa]
 P_7 : pressão do gás no ponto 6 do compressor de gás [kPa]
 η_{isoc} : eficiência isoentrópica do compressor [80%] (VILLELA, 2007)
 $\lambda_{gás}$: relação entre calor específico a pressão constante e calor específico a volume constante do ar [kJ/kg.K].
 $\Omega_{el.TG}$: porcentagem de eletricidade que a turbina a gás pode suprir no gaseificador a plasma [%]
 $c_{p.gás}$: calor específico a pressão constante do gás [kJ/kg.K]
 $Ex_{física}$: exergia física [kW]
 P_0 : pressão do ponto morto [100 kPa]
 $P_{gás}$: pressão do gás [kPa]
 $R_{gás}$: constante dos gases para o gás [kJ/kg.K]
 T_0 : temperatura do ponto morto [298 K]
 $T_{gás}$: temperatura do gás [K]
 ex_i : exergia específica química do componente i [kJ/kg]
 $Ex_{química}$: exergia química [kW]
 R : constante dos gases [kJ/kg.K]
 ε : eficiência de Segunda Lei [-]
 $Ex_{combustível}$: exergia do combustível [kW]
 $Ex_{produto}$: exergia do produto [kW]
 $\sum Ex_e$: somatória da exergia de entrada [kW]
 $\sum Ex_s$: somatória da exergia de saída [kW]
 ψ : eficiência de racional de Bosnakovic [-]
 I : irreversibilidade [kW]
 f : fator de anuidade [1/ano]
 k : período de amortização de capital (*payback*) [anos]
 r : taxa de anual de juros [%]
 $C_{gás}$: custo de produção do gás [US\$/kWh]
 $C_{man_{gp.plant}}$: custo de manutenção da planta de gaseificação a plasma [US\$/kWh]
 $C_{op_{gp.plant}}$: custo de operação da planta de gaseificação para configuração [US\$/kWh]
 H : período equivalente de utilização [h/ano]

$Inv_{gp.plant}$: investimento da planta de gaseificação a plasma [US\$]
 $Cop_{gp.plant}$: custo de operação da planta de gaseificação para configuração [US\$/kWh]
 $P_{el.}$: tarifa de eletricidade [US\$/kWh]
 $C_{el.MCI}$: custo de produção de eletricidade no motor de combustão interna [US\$/kWh]
 Cop_{MCI} : custo de operação do motor de combustão interna [US\$/kWh]
 $Cman_{MCI}$: custo de manutenção do motor de combustão interna [US\$/kWh]
 Inv_{MCI} : investimento no motor de combustão interna [US\$]
 $C_{el.TG}$: custo de produção de eletricidade na turbina a gás [US\$/kWh]
 $Cman_{TG}$: custo de manutenção da turbina a gás [US\$/kWh]
 Cop_{TG} : custo de operação da turbina a gás [US\$/kWh]
 Inv_{TG} : investimento no conjunto turbina a gás [US\$]
 $Inv_{C.gás}$: investimento no compressor de gás [US\$]
 Inv_{gp} : investimento no gaseificador a plasma [US\$]
 Inv_{SL} : investimento do sistema de limpeza do gás [US\$]
 Inv_{TC} : investimento no trocador de calor [US\$]
 C : custo do equipamento para uma grandeza de interesse S [US\$]
 C_r : custo do equipamento para uma grandeza de referência S_r [US\$]
 m : fator de incidência que indica a escala de economia [0,5 – 1,0]
 $C_{descarte.RSS}$: custo de descarte do RSS [US\$/ano]
 $C_{el.X}$: custo de produção da eletricidade [US\$/ kWh]
 \dot{E}_{pY} : potência elétrica produzida no MCI ou CTG [US\$/kWh]
 $P_{v.el.}$: preço de venda da eletricidade produzida em cada configuração [US\$/kWh]
 R_{anual} : receita anual [US\$/ano]
 $C_{destruição.RSS}$: custo de destruição do RSS [US\$/ano]
 $C_{transporte}$: custo de transporte do RSS [US\$/ano]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS E JUSTIFICATIVA	22
1.2	ESTRUTURA DA TESE	23
1.3	OBJETIVOS	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS	25
2.1.1	Resíduos sólidos de serviços de saúde	26
2.2	TECNOLOGIAS PARA DESCARTE DO RESÍDUOS SÓLIDOS DO SERVIÇO DE SAÚDE.....	28
2.2.1	Incineração	28
2.2.2	Autoclave	29
2.2.3	Microondas	29
2.2.4	Tratamento químico	30
2.2.5	Processo de gaseificação	30
2.2.6	Tecnologia de gaseificação a plasma	32
2.2.6.1	Plasma.....	32
2.2.6.2	Tocha	33
2.2.6.3	Gaseificação a plasma	35
2.2.6.4	Gaseificação a plasma do resíduo sólido do serviço de saúde	40
2.3	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DO SERVIÇO DE SAÚDE DO BRASIL	46
3	DIMENSIONAMENTO DO GASEIFICADOR A PLASMA	48
3.1	PONTO DE OPERAÇÃO DO GASEIFICADOR A PLASMA.....	48
3.2	POTÊNCIA REQUERIDA NA TOCHA DE PLASMA	50
3.3	DIÂMETRO E ALTURA INTERNA DO GASEIFICADOR A PLASMA.....	51
3.4	DIÂMETRO DE ENTRADA DO RESÍDUO SÓLIDO DO SERVIÇO DE SAÚDE (d ₁).....	54
3.5	DIÂMETRO DE SAÍDA DAS CINZAS (d ₂).	56
3.6	DIÂMETRO DE SAÍDA DO GÁS (d ₃).....	57
3.7	ESPESSURA DO SISTEMA DE ISOLAMENTO.....	58
4	ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA	62

4.1	SISTEMA GASEIFICADOR A PLASMA ASSOCIADO AO MCI E AO CTG	62
4.2	ANÁLISE ENERGÉTICA	63
4.2.1	Análise energética do gaseificador a plasma	63
4.2.2	Análise energética do trocador de calor e sistema de limpeza	65
4.2.3	Seleção do motor de combustão interna	68
4.2.4	Eficiência energética do sistema gaseificador a plasma associado ao MCI...	70
4.2.5	Porcentagem de eletricidade que o MCI pode suprir no gaseificador a plasma	71
4.2.6	Seleção do conjunto turbina a gás	71
4.2.7	Turbina a gás	72
4.2.8	Análise energética do compressor de ar	73
4.2.9	Análise energética da câmara de combustão	74
4.2.10	Análise energética do compressor de gás	75
4.2.11	Eficiência energética do sistema gaseificador a plasma associado ao conjunto turbina a gás	76
4.2.12	Porcentagem de eletricidade que a turbina a gás pode suprir no gaseificador a plasma	76
4.3	ANÁLISE EXERGÉTICA	77
4.3.1	Análise exergética do gaseificador	80
4.3.2	Análise exergética do trocador de calor	82
4.3.3	Análise exergética do motor de combustão interna	83
4.3.4	Análise exergética do compressor de gás	84
4.3.5	Análise exergética do compressor de ar	85
4.3.6	Análise exergética da câmara de combustão	86
4.3.7	Análise exergética da turbina a gás	87
5	ANÁLISE ECONÔMICA	89
5.1	FATOR DE ANUIDADE	89
5.2	CUSTO DE PRODUÇÃO DE GÁS (SYNGAS)	89
5.3	CUSTO DE PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE NO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA	91
5.4	CUSTO DE PRODUÇÃO DA ELETRICIDADE NO CONJUNTO TURBINA A GÁS	92
5.5	INVESTIMENTOS	93

5.5.1	Investimento no gaseificador a plasma	93
5.5.2	Investimento no trocador de calor	95
5.5.3	Investimento no sistema de limpeza	95
5.5.4	Investimento no motor de combustão interna.....	96
5.5.5	Investimento no conjunto turbina a gás.....	97
5.5.6	Investimento no compressor de gás.....	97
5.5.7	Receita anual.....	98
6	ESTUDO DE CASO E RESULTADOS	100
6.1	ESTUDO DE CASO	100
6.2	RESULTADOS	104
6.2.1	Resultados do dimensionamento do gaseificador	104
6.2.2	Resultados da análise energética	116
6.2.3	Resultados da análise exérgica	123
6.3	RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA	129
7	CONCLUSÕES	137
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	138
	REFERÊNCIAS	139

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E JUSTIFICATIVA

O levantamento realizado pela ABRELPE (2020), aponta que, em 2018, 18,49% dos municípios brasileiros não prestaram serviço de coleta de Resíduos Sólidos do Serviço de Saúde (RSS). No ano de 2019, aproximadamente 36% das cidades brasileiras que coletaram RSS descartaram sem nenhum tratamento prévio, o que não está de acordo com as leis vigentes, elevando os riscos ao meio ambiente, aos trabalhadores e à saúde pública (ABRELPE, 2020).

A pandemia Covid-19 assolou o mundo e trouxe uma preocupação muito grande em relação à saúde pública. O avanço do número de casos de pessoas infectadas e a necessidade de internação fez com que hospitais de campanha fossem construídos rapidamente. Analisando em relação ao aspecto da produção de RSS, a Agência Brasil (2021) divulgou que houve o aumento de 20% da geração deste tipo de resíduo no Brasil no mês de junho de 2020 em comparação a igual período do ano anterior que não havia pandemia.

Devido ao aumento da produção de RSS e ao seu descarte inadequado é de suma importância o desenvolvimento e disseminação de tecnologias que possam reduzir ou eliminar estes problemas. Dentre as tecnologias relacionadas ao descarte do RSS, destacam-se: incineração, autoclave, microondas e gaseificação. Mas, estas tecnologias não aproveitam o poder energético do RSS, e ou não reduz o seu volume, ou ainda produz gases poluentes em seu processamento. Desta forma, a tecnologia mais indicada é a gaseificação a plasma, devido a intensa radiação ultravioleta produzida pelo plasma e em alta temperatura de processamento garantem uma eficiente e rápida destruição do resíduo orgânico contaminado, presente no lixo hospitalar, e ainda produz o syngas que pode ser queimado conjunto turbina a gás ou em motor de combustão interna para gerar eletricidade e/ou calor útil (LAR, 2011).

Nesse contexto e considerando que o Brasil possui ínfimos estudos sobre a composição dos resíduos sólidos do serviço de saúde e que não há nenhum estudo sobre a gaseificação a plasma deste tipo de resíduo, neste trabalho desenvolve-se metodologia de cálculo para determinar o ponto de operação, composição o gás de síntese e as principais dimensões do gaseificador a plasma a RSS. São estudados os aspectos técnicos e econômicos das plantas geradoras de energia associando gaseificadores a plasma com motor de combustão interna (MCI) ou com conjunto turbina a gás (CTG), de modo a obter dados em relação a geração de energia associada a este tipo de tecnologia.

1.2 Estrutura da tese

Esta Tese é dividida em sete capítulos, os quais são resumidamente descritos a seguir.

Capítulo 1 – Introdução

Neste capítulo são apresentadas as considerações iniciais, a estrutura do trabalho de tese e seus objetivos.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é realizado um levantamento bibliográfico para avaliar a produção de resíduos sólidos do serviço de saúde no Brasil, das tecnologias utilizadas para o descarte deste tipo de resíduo, da tecnologia de gaseificação a plasma. E ainda é apresentada a composição do RSS produzido no Brasil.

Capítulo 3 – Modelagem de dimensionamento do gaseificador

Este capítulo apresenta estudos dos aspectos termodinâmicos associados ao processo de gaseificação a plasma de modo a propor equações para determinar as principais dimensões do reator. São determinados o ponto ótimo de operação, e juntamente com o tempo de residência do RSS no gaseificador, são desenvolvidas equações (com base na termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor) para determinar as principais dimensões do reator.

Capítulo 4 – Análise energética e exergética

Neste capítulo é apresentada análise energética e a análise exergética. Desta forma, é determinado o potencial da geração de eletricidade a partir da gaseificação a plasma associado ao MCI e ao CTG. Também são apresentados os equipamentos que possui maiores irreversibilidades. Por fim, são apresentados os diagramas de Sankey e Grassmann.

Capítulo 5 – Análise de engenharia econômica

Neste capítulo são efetuados cálculos de viabilidade econômica dos sistemas de geração de energia, determinando os custos da produção de gás de síntese e da eletricidade, todos em US\$/kWh, buscando indicar qual das configurações escolhidas é a mais viável em termos de receita anual esperada e *payback*.

Capítulo 6 – Estudo de caso e resultados

Um estudo de caso é apresentado neste capítulo considerando a cidade de São Paulo-SP, Brasil, e os respectivos resultados de dimensionamento do gaseificadores a plasma, análise energética e exergética e análise econômica.

Capítulo 7– Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais e conclusões obtidas através da comparação dos processos estudados. E também, sugestões são discutidas para trabalhos futuros.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral desta tese é estudar o processo de gaseificação de resíduos sólidos do serviço de saúde, propondo uma metodologia de dimensionamento de gaseificador a plasma e efetuando análises termodinâmica e econômica de um estudo de caso. Têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Determinar o melhor ponto de operação e as principais dimensões do gaseificador a plasma.
- Determinar o potencial de produção de eletricidade, a eficiência energética e exergética de cada equipamento e selecionar o motor de combustão interna e conjunto turbina a gás.
- Determinar o custo de produção de gás (syngas) e eletricidade em US\$/kWh, receita anual e *payback*.
- Aplicar a metodologia de dimensionamento, análise termodinâmica e econômica ao estudo de caso da cidade de São Paulo -SP.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

Os avanços tecnológicos e o crescimento populacional colaboraram para o aumento da diversidade e aumento de resíduos gerados no Brasil e no mundo, que necessitam de um descarte adequado.

Segundo Brasil (2018), os resíduos sólidos podem ter as seguintes classificações:

I - quanto à origem:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

II - quanto à periculosidade:

- a) resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;
- b) resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea “a”. (BRASIL, 2018)

2.1.1 Resíduos sólidos de serviços de saúde

Os Resíduos Sólidos dos Serviços de Saúde (RSS) são oriundos de atividades de unidades de serviço de saúde, clínicas odontológicas, médicas, farmacêuticas, laboratoriais, e centros de ensino e pesquisa na área tanto da saúde humana quanto animal. Incluindo sangue, vacinas vencidas, hemoderivados, fluidos orgânicos, tecidos, rejeitos radioativos, perfurocortantes, resíduos químicos e farmacêuticos, e entre outros (NBR 12.808, 1993).

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) passou a exigir, a partir de 15 de julho de 2004, que clínicas, laboratórios, hospitais sigam a Resolução nº 33 de fevereiro de 2003, para fazer o tratamento, acondicionamento e transporte do lixo produzido, desde a produção até a destinação final (MMA, 2018).

O Regulamento Técnico da Resolução nº 33 dispõe que farmácias, clínicas veterinárias, postos de saúde, necrotérios são responsabilizados por todo o resíduo que produzirem a fim de reduzir a geração de RSS e este ter uma destinação adequada, com o objetivo de proteger os trabalhadores, preservar recursos naturais, o meio ambiente e a saúde pública.

De acordo com a Anvisa por meio da RDC no 306/2004 e do Conama pela Resolução no 358/2005, os RSS são divididos em cinco grupos:

- 1) **Grupo A** – biológicos: “resíduos com a possível presença de agentes biológicos que, por suas características, podem apresentar risco de infecção”. Exemplos: culturas e estoques de microorganismos; resíduos com suspeita ou certeza de contaminação biológica de risco 4; bolsas de sangue ou hemocomponentes contaminados ou mal conservados; sobras de amostras de laboratório contendo fezes, urinas e secreções sem suspeita de agentes de classe de risco 4; rejeitos de animal (carcaças) vísceras; peças anatômicas humanas e de animal; resíduos provenientes de cirurgia plástica (lipoaspiração ou lipoescultura); órgãos, tecidos e fluidos orgânicos; entre outros.
- 2) **Grupo B** – químicos: “resíduos contendo substâncias químicas que podem apresentar risco à saúde pública ou ao meio ambiente, dependendo de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade”. Exemplos: produtos hormonais e antimicrobianos, citostáticos, imunossuppressores descartados por serviços de saúde; resíduos de saneantes, desinfetantes, desinfestantes; resíduos contendo metais pesados; reagentes para laboratório; efluentes de equipamentos de análises clínicas; entre outros.
- 3) **Grupo C** – radioativos: “quaisquer materiais resultantes de atividades humanas que contenham radionuclídeos em quantidades superiores aos limites de isenção especificados nas normas do CNEN e para os quais a reutilização é imprópria ou não prevista.”

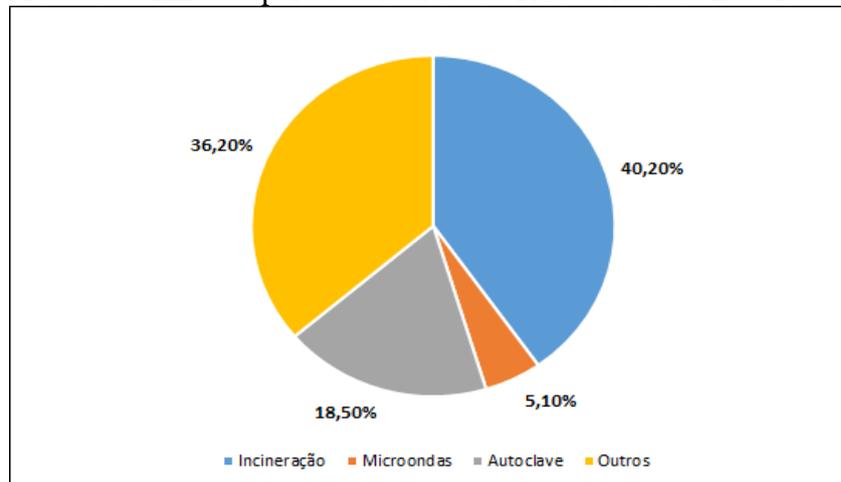
Exemplos: rejeitos radioativos ou contaminados com radionuclídeos, medicina nuclear e radioterapia, segundo a Resolução CNEN-NE-6.05.

4) Grupo D – comuns: “resíduos que não apresentem risco biológico, químico ou radiológico à saúde ou ao meio ambiente, podendo ser equiparados aos resíduos domiciliares.” Exemplos: papéis de uso sanitário e fraldas, restos de alimentos, resíduos de áreas administrativas e de limpeza geral, materiais recicláveis, gesso.

5) Grupo E – perfurocortantes: representam os objetos e instrumentos contendo bordas ou protuberâncias agudas capazes de cortar ou perfurar. Exemplos: lâminas em geral, agulhas, escalpes, ampolas de vidro, brocas, espátulas, entre outros.

O Brasil possui 5570 municípios (IBGE, 2021), destes somente 4540 coletaram os RSS em 2018, conforme último Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019 (ABRELPE, 2018-2019), que corresponde a 81,5% dos municípios brasileiros. E ainda, que 36,2% dos RSS coletados não tiveram uma adequada destinação, foram enviados para aterros, lixões, valas sépticas sem prévio tratamento. No Brasil, em 2018, a média de produção de RSS foi de aproximadamente de 1,2 kg por habitante ao ano que corresponde a 252948 toneladas (ABRELPE, 2018-2019). A figura 1, apresenta os principais destinos dos RSS coletados no Brasil em 2018.

Figura 1 – Processo utilizados para o descarte dos RSS coletados nas cidades brasileiras



Outros*: corresponde ao RSS sem tratamento prévio enviados a lixões, aterros e valas sépticas.

Fonte: ABRELPE (2018-2019)

Observa-se que as principais destinações dos RSS são incineração (40,2%) e “outros” (36,2%) que representa a parcela de RSS enviado para lixões, aterros, valas sépticas, etc.

Cafure e Patriarcha-Gracioli (2015), afirmam que os impactos ambientais causados pela gestão inadequada de RSS podem contaminar e elevar os índices de infecção hospitalar ou gerar

epidemias, devido a contaminação do lençol freático. Assim, é essencial que tecnologias que tenham por objetivo o descarte correto e efetivo dos RSS sejam desenvolvidas e aplicadas por todos os municípios brasileiros e por todo o mundo.

2.2 TECNOLOGIAS PARA DESCARTE DO RESÍDUOS SÓLIDOS DO SERVIÇO DE SAÚDE

2.2.1 Incineração

O processo de incineração do RSS não é obrigatório como método de tratamento (Resolução N° 5/93 da CONAMA), mas é considerada por muitos técnicos como a melhor forma de tratamento e destruição do resíduo sólido do serviço de saúde (DUARTE et al., 2014).

Segundo Duarte et al. (2014), o processo incineração ocorre normalmente em temperaturas acima de 900°, e consiste na queima de materiais em mistura com um excesso de ar de 10 a 25% e tempo pré-estabelecidos. Assim, os compostos orgânicos a base de carbono são sintetizados formando, principalmente, CO₂, H₂O e cinzas.

Os resíduos são processados em duas câmaras de combustão no processo de incineração. A primeira câmara de combustão opera com temperaturas entre 800 e 1000 °C, nesta os resíduos são decompostos em cinzas, escória e gases. Estes são destinados a segunda câmara e queimados a temperaturas que variam entre 1200 e 1400 °C. Os gases que são destinados a atmosfera são resfriados, lavados e tratados em ciclones para que sejam eliminados os compostos tóxicos. Os resíduos que tem em sua composição fósforo, cloro ou enxofre precisam de um tempo de residência maior na câmara secundária e é necessário sistemas mais tecnológicos para tratar os gases que são lançados para a atmosfera (PRS, 2018)..

Como visto, a incineração tem sido um método largamente utilizado no tratamento de RSS. A vantagem da incineração é a desativação do resíduo acompanhado pela redução significativa do volume destinado a aterro que atinge cerca de 10% do volume original (GUPTA et al., 2009). No entanto, alguns RSS são difíceis de serem processados por incineração (por exemplo, bolsas de urina cheias e partes do corpo) e precisam de atenção especial. Entre as desvantagens podem ser citadas a produção de uma grande quantidade de gases a serem tratados e a inércia térmica do incinerador que dificulta o controle da temperatura no reator. Todavia, o processo de incineração de RSS é uma das principais fontes de poluição por dioxinas e furanos, em parte devido à presença de produtos de PVC (SOLIMAN et al., 2007 e MESSERLE et al., 2018).

2.2.2 Autoclave

No processo que utiliza a autoclave hospitalar, os RSS são submetidos a um tratamento térmico, sob determinadas pressões, numa câmara selada, onde vácuo é produzido e é injetado vapor d'água com temperaturas que variam de 105 a 150 °C. Nesta situação todos os tipos de microorganismos podem ser mortos, tornando os RSS estéreis (DUARTE et al., 2014 e PRS, 2018).

Este processo tem custos operacionais baixos, não emitem efluentes gasosos e os efluentes líquidos são estéreis, mas não há redução do volume dos RSS. Apesar do sistema de autoclavagem ser uma tecnologia de desinfecção totalmente adequada para o descarte de RSS, não há redução do volume do resíduo, logo deve-se acrescentar o processo de trituração para reduzir o volume em 60-80% e depois destinar a aterros sanitários (GUPTA et al., 2009). Desta forma, esta tecnologia somente desinfecta o RSS, e não reduz seu volume ou aproveita o seu poder energético.

2.2.3 Microondas

Neste processo os RSS são previamente triturados e umedecidos com água ou vapor líquido, submetendo à vibrações eletromagnéticas de alta frequência e temperaturas de 98 a 105°C. Desta maneira, as moléculas de H₂O presentes nos resíduos se movimentam em altas velocidades, produzindo um alto grau de calor, ocasionando a destruição de todos os microorganismos (DUARTE et al., 2014).

Tonuci et al. (2008), afirma que o equipamento de microondas usado para o processamento de RSS é patenteado pelas Indústrias Sanitec. Este sistema de microondas utiliza aproximadamente 270 kWh/t de resíduos processados, isto é, 270 Wh/ kg de resíduos. A empresa oferece sistemas capazes de tratar até 400 kg/h. O custo instalado de um sistema capaz de tratar cerca de 230 kg/h foi estimado em cerca de um quinto do custo instalado de um incinerador convencional.

Neste processo não há emissão de nenhum tipo de efluente e o custo de operação é relativamente baixo quando comparado ao incinerador convencional, mas é necessário um segundo processo para que se tenha o descarte completo dos RSS.

2.2.4 Tratamento químico

O processo de descontaminação por tratamento químico é utilizado para tratar líquidos orgânicos e sangue humano, e objetos perfuro-cortantes. Esta tecnologia não é adequada para o processamento de resíduos anatômicos (MANUAL RSS, 2018).

De acordo com PRS (2018), neste processamento os resíduos são triturados e imersos, durante alguns minutos, numa solução composta por dióxido de cloro, hipoclorito de sódio ou gás formaldeído. Ao finalizar o processamento, os resíduos são levados para secagem, produzindo efluentes líquidos que necessitam ser neutralizados antes de ser descartado ao meio ambiente.

Este é um processo bem eficiente e econômico, mas é necessário de neutralizar efluentes e não há redução do volume dos resíduos. Logo, para que os RSS sejam corretamente descartados necessitam de mais dois processos além deste.

2.2.5 Processo de gaseificação

A utilização do processo de gaseificação tem aproximadamente 100 anos. Os suecos fizeram uso desta tecnologia na década de 1920, seus carros eram movidos por gaseificadores de madeira, devido à escassez de petróleo. Na Segunda Guerra Mundial (1939-1945), os pesquisadores fizeram uma gama de estudos para otimizar o projeto de gaseificadores de madeira e melhorar sua eficiência. Mas foi na década de 1970 e 80, que cerca de 40 empresas propuseram construir usinas de gaseificação a biomassa, a fim de gerar calor e energia (SIKARWAR, 2017).

A gaseificação é a tecnologia que converte uma biomassa rica em carbono em um combustível gasoso denominado syngas (PARTHASARATHY e NARAYANAN, 2014). O syngas é uma mistura, principalmente, de monóxido de carbono (CO), de hidrogênio (H₂), e de dióxido de carbono (CO₂). Este processo ocorre num reator, gaseificador, e as reações ocorrem na presença de agente gaseificador que pode ser oxigênio, ar ou vapor de água. O poder calorífico do syngas varia conforme o agente de gaseificação, utilizando ar o valor é de 3-5 MJ/Nm³ e oxigênio ou vapor fica na faixa de 10-18 MJ/Nm³ (LAPUERTA et al., 2008).

A gaseificação é dividida em cinco etapas, secagem, pirólise, combustão, gaseificação, reações adicionais (NICODÈME et al., 2018):

- A secagem consiste na evaporação da umidade da biomassa e geralmente ocorre em torno de 100 °C. A energia térmica necessária para a evaporação vem de outras etapas

do processo, em particular a oxidação. O vapor gerado pela vaporização da água pode ser misturado com o fluxo de gás e participar de reações químicas subsequentes, particularmente a reação de troca de água-gás, se a temperatura for alta o suficiente.

- A pirólise é a etapa onde ocorre uma degradação termoquímica da biomassa e ocorre entre 250 e 700 °C. A quebra de ligações químicas ocorre e compostos de baixo peso molecular são produzidos a partir do material orgânico. A reação de pirólise exige calor que provém da etapa de oxidação. A equação (2.1) apresenta a reação de pirólise:



- Na oxidação, o oxigênio reage com compostos voláteis liberados durante a pirólise, bem como uma parte do carvão para gerar dióxido de carbono (equação (2.2)) e uma pequena quantidade de monóxido de carbono (equação (2.3)). E também ocorre a combustão de hidrogênio gerando água (equação (2.4)). As três reações são exotérmicas e, portanto, fornecem a energia térmica necessária para sustentar o processo de gaseificação.



- Durante a etapa de gaseificação, a mistura gasosa e o carvão, gerados durante as etapas de pirólise e oxidação, reagem uns com os outros para obter o syngas final. O carbono presente no carvão que reage com o vapor produz hidrogênio e monóxido de carbono, de acordo com a reação da equação (2.5). Durante a etapa de redução também ocorre a reação de *Boudovard* (equação (2.6)), reação de metanação (equação (2.7)) e reação de troca de gás-água (equação (2.8))





- No caso de uma alta conversão de carbono, as reações heterogêneas (2.5), (2.6), (2.7) são substituídas pela reação de troca de gás-água e reforma a vapor do metano (equação (2.9)). Estas reações homogêneas da fase gasosa desempenham um papel importante na determinação da composição final do gás de síntese.



A desvantagem da gaseificação, no caso de gaseificador de leito fluidizado, por exemplo, usam temperaturas relativamente baixas para evitar a aglomeração e sinterização de cinzas no leito durante o processamento. Com isso, o gás produzido neste tipo de gaseificador tem em sua composição alcatrões e outras espécies orgânicas condensáveis que criam obstáculos no processo e exigem as técnicas custosas e complexas para serem removidas. Além disso, as cinzas geradas neste tipo de gaseificador podem conter altos níveis de carbono fixo, metais pesados e poluentes orgânicos que reduzem a eficiência de conversão do processo e limitam o uso secundário [MATERAZZI, 2016]. Estas desvantagens é um limitante para o uso desta tecnologia no processamento de resíduos sólidos do serviço de saúde.

2.2.6 Tecnologia de gaseificação a plasma

2.2.6.1 Plasma

O plasma é uma matéria ionizada de alta temperatura (2000 a 5000 °C) que inclui elétrons, partículas neutras além de íons. Geralmente é definido como o quarto estado da matéria que pode ser considerado eletricamente neutro (TAYLOR e FRANCIS 1994 apud CARPINLIOGLU e SANLISOY, 2018).

De acordo com Ducharme e Themelis (2010), o plasma é criado pela ionização de um gás de trabalho por onde flui uma corrente elétrica (CC ou CA). As moléculas de gás colidem com carga de elétrons e isso cria partículas carregadas. Quando são criadas partículas suficientes carregadas, tanto positivamente quanto negativamente, o gás começa a conduzir eletricidade.

Colisões entre partículas carregadas também ocorrem liberando calor e formando um arco de luz que é chamada de plasma.

O plasma é formado em uma tocha, onde a temperatura é muito alta, mas quando entra em contato com partículas de combustível, a temperatura diminui e se estabiliza entre 2500°C e 4500 °C (ZHANG et al., 2013b)

O plasma pode ser utilizado de duas maneiras diferentes no processo de gaseificação: (1) o plasma é usado como fonte de calor durante a gaseificação; (2) o plasma é usado para quebrar o alcatrão após gaseificação convencional (SIKARWAR et. al, 2016).

2.2.6.2 Tocha

As tochas a plasma são elementos cruciais da tecnologia de gaseificação. O plasma térmico emerge em uma descarga estacionária sob alta pressão. Campos elétricos, com frequências que variam de zero (corrente contínua (CC)) até os espectros ópticos (corrente alternada (CA)) podem ser utilizados para obter o plasma térmico (TENDLER et. al, 2005).

O jato de gás que sai de uma tocha a plasma está em temperaturas até 5.000 °C ou mais e é capaz de vaporizar materiais e destruir quaisquer ligações químicas. Isso levou a muitos esforços para utilizá-lo em processamento de materiais residuais (DUCHARME E THEMELIS, 2010).

De acordo com Tendler et. al. (2005), as tochas de CC e CA têm quase o mesmo desempenho de potência (até 3 MW), com fluxo de plasma de até 100 g/s e tempo de vida útil é de até 1000h.

A tabela 1 apresenta as diferenças entre tochas de CC e CA em relação ao gás de trabalho, à descarga do plasma e ao arco.

Tabela 1 – Diferenças entre tochas de CC e CA

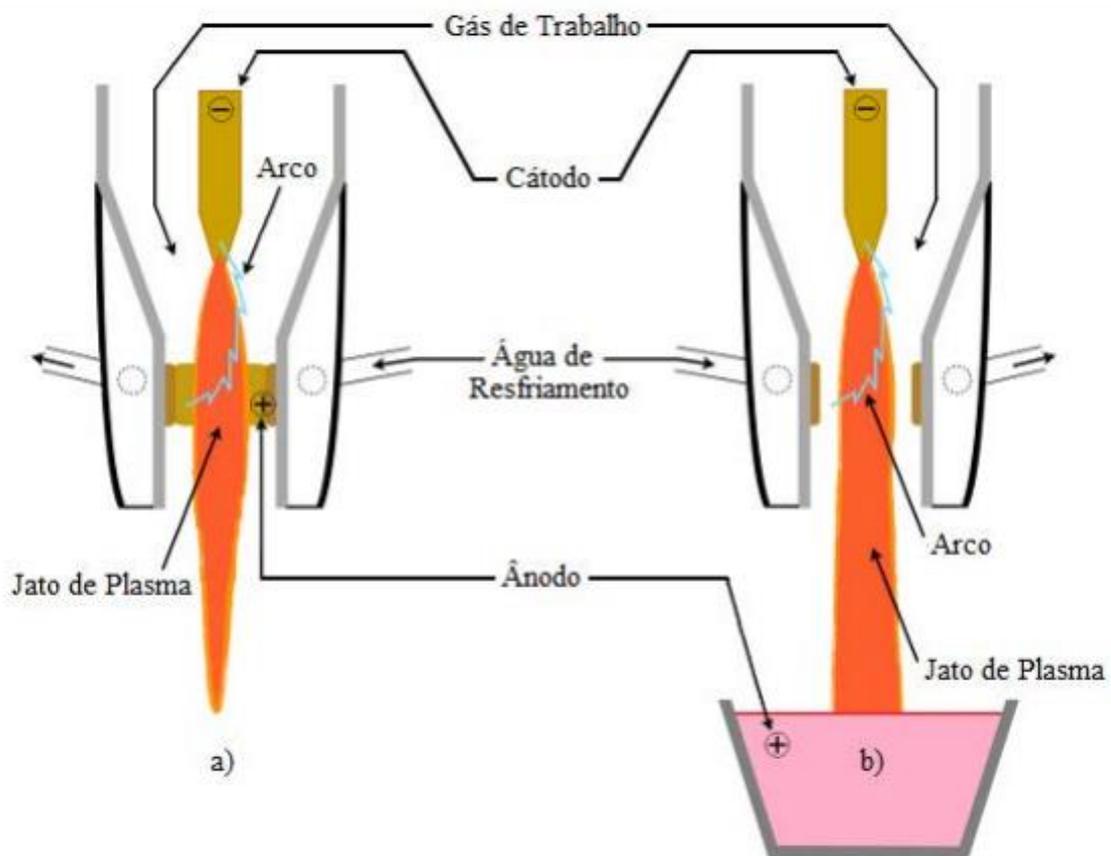
Parâmetro	CC	CA
Gás de trabalho	ar, nitrogênio (N ₂), hidrogênio (H ₂), argônio (Ar), hélio (He)	ar, nitrogênio (N ₂), hidrogênio (H ₂), argônio (Ar), hélio (He) e dióxido de carbono (CO ₂)
Descarga do plasma	estável	menos estável, mas com eficiência entre 70 -90%
Arco	contraído	contraído ou difuso

Fonte: adaptado de Tendler et. al. (2005)

Segundo com Ducharme e Themelis (2010) para o tratamento de resíduos, o plasma é preferencialmente gerado por descarga elétrica de corrente contínua (CC) e dois tipos de dispositivos podem ser usados: arcos transferidos e não transferidos. No modo não transferido, o arco é inflamado entre dois eletrodos refrigerados por água dentro da tocha e o plasma sai da tocha através de um bico, que pode ser um dos eletrodos, geralmente o ânodo. Para arcos transferidos, o material a ser tratado está em contato direto com o eletrodo auxiliar. Isso tem a vantagem de alta transferência de calor para o material tratado e baixa perda de potência para o corpo da tocha. Alguns sistemas de tocha a plasma podem ser alternados entre modo de arco não transferido e transferido. No entanto, o uso de arcos transferidos depende de um eletrodo auxiliar eletricamente condutor, por exemplo, um metal fundido ou banho de escória (HRABOVSKY e VAN DER WALT, 2017).

A figura 3 apresenta o modelo da tocha a plasma de arco não transferido e transferido.

Figura 2: a) Arco não transferido; b) Arco transferido



Fonte: Rébola (2016)

2.2.6.3 Gaseificação a plasma

O tratamento térmico e a gaseificação é uma das tecnologias mais eficazes de destruição de resíduos perigosos. Entretanto, há muitas substâncias que quando tratadas com processos convencionais não são neutralizadas, causando ameaças à saúde humana e à natureza. A tecnologia a plasma surge para amenizar ou eliminar este problema, permitindo destruir todos os resíduos que contenham substâncias nocivas (ZHOVTYANSKY e VALINCIUS, 2018).

De acordo com Zhovtyansky e Valincius (2018), a tecnologia de gaseificação a plasma é recomendado para processar resíduos sólidos municipais, comerciais, industriais, petroquímicos e do serviço de saúde. O syngas oriundo da gaseificação a plasma é convertido em grande variedade de produtos energéticos, incluindo: eletricidade, através de turbinas a gás, motores alternativos e células de combustível; calor e vapor.

A gaseificação a plasma de resíduos explora as propriedades termoquímicas do plasma. O plasma fornece a energia necessária para manter a temperatura dentro do reator em valores suficientes para a dissociação de moléculas de gases produzidos por decomposição do resíduo. Devido à alta temperatura, os componentes inorgânicos dos materiais tratados são derretidos, os componentes orgânicos são volatilizados e moléculas complexas são dissociadas. Os inorgânicos fundidos são removidos do reator e após o resfriamento e a solidificação produzem uma substância semelhante à escória. Materiais orgânicos, contendo principalmente carbono, hidrogênio e oxigênio ligados quimicamente, são decompostos em syngas que podem ser utilizados como combustível de alta qualidade ou na indústria química (HRABOVSKY e VAN DER WALT, 2017).

Os pesquisadores estão com profundo interesse na tecnologia de plasma, principalmente na aplicação de neutralização de substâncias nocivas. No Japão, a empresa de gestão de resíduos médicos implementou um grande projeto, cujo principal objetivo é transformar o lixo hospitalar local em produtos úteis, como: vidro, metal e syngas (ZHOVTYANSKY e VALINCIUS, 2018).

Um sistema de gaseificação por plasma consiste nos seguintes componentes: sistema de alimentação, tochas de plasma e fontes de alimentação, reator de gaseificação, equipamento de manuseio de escória, sistema de tratamento de gás e sistema de monitoramento e controle. O sistema de alimentação acomoda diferentes tipos de matéria-prima e, se necessário, prepara a matéria-prima por moagem antes de entrar no reator (JANAJREH et. al, 2013).

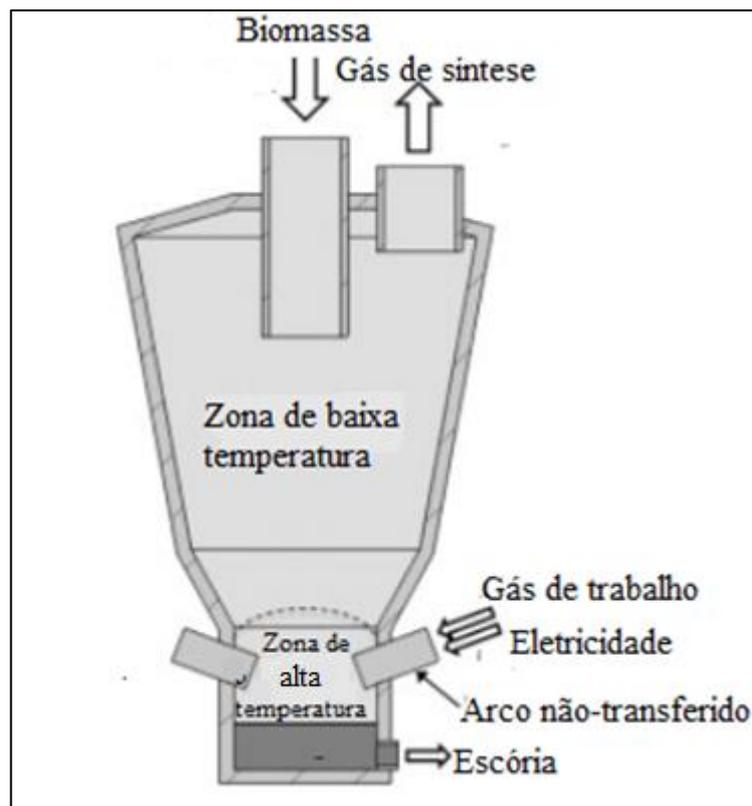
Os gaseificadores a plasma são de várias configurações, mas normalmente consistem em um reator conectado a uma tocha de plasma que fornece a energia necessária para as reações de gaseificação. A câmara do reator é feita de material refratário capaz de suportar as altas temperaturas da tocha a plasma. Quando a matéria-prima entra no reator, o plasma de alta temperatura o decompõe e a porção inorgânica/cinza é reduzida a uma escória fundida (MOUSTAKAS et. al, 2005). E Sikarwar et. al (2016) afirma que devido a temperatura elevada, a gaseificação da matéria-prima ocorre em milissegundos.

O processo de gaseificação a plasma tem várias características de projeto, como a configuração do gaseificador, o mecanismo de alimentação e o acúmulo e coleta de gás de síntese e escória. Os gaseificadores a plasma podem ser classificados em três tipos principais: gaseificadores de leito arrastado a plasma, gaseificadores de leito fixo a plasma e gaseificadores de leito móvel a plasma. Em um gaseificador de leito arrastado de plasma, a biomassa ou resíduo é injetado com gás de plasma como fluxos de entrada, e o gás de síntese e a escória são coletados como fluxos de saída do gaseificador. Em um gaseificador de leito fixo a plasma, o

plasma é injetado no leito fixo, onde o gás de síntese pode ser coletado da parte superior do gaseificador enquanto a escória é coletada na parte inferior. Em um gaseificador de leito móvel a plasma, o resíduo é alimentado continuamente na parte superior e na parte inferior do gaseificador e o plasma é injetado no fluxo de alimentação. A influência dessas características de projeto nas reações de gaseificação do plasma e na cinética da reação é crucial (MUNIR et. al, 2019).

A figura 2 mostra um gaseificador a plasma com entrada de biomassa (resíduos) e saída de gás de síntese na parte superior, na parte inferior está a saída de escória; no interior do reator há uma zona de alta temperatura (onde ocorre o processo de gaseificação) que estão localizadas as tochas a plasma que são acionadas pelo gás de trabalho e eletricidade e uma zona de baixa temperatura (espaço onde o gás de síntese transfere calor para a biomassa).

Figura 3 – Gaseificador a plasma



Fonte: Adaptado de Janajreh et. al (2013)

Segundo Zhao (2010), a escória é coletada no fundo do reator, onde é removida de forma contínua ou periódica. Pode ser derramado em moldes para criar lingotes ou tijolos ou extinto em água para criar grânulos a serem reutilizados ou descartados em aterros.

As reações que compõe o processo de gaseificação a plasma são complexas, e ainda requerem estudos, e consistem nas reações sólido-gás e fase gasosa (Moustakas et al., 2005):

- Reações sólido-gás:

a) Combustão:



b) Hidrogaseificação:



c) Carbono – vapor:

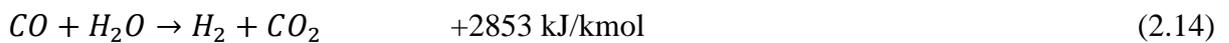


d) *Boudovard*:



- Reações fase gasosa

a) Troca água-gás:



b) Metanação:



A gaseificação do plasma resulta essencialmente na forma de syngas (CO e H₂) e ínfimas quantidades de gases poluentes. Desta forma, o gás de síntese é submetido a limpeza e recuperação de calor. Uma vez limpo, pode ser queimado no ciclo de vapor ou gás ou no motor a gás ou usado na produção de produtos químicos. Todo o processo deve ser monitorado e

controlado para garantir o desempenho ideal da temperatura do sistema, taxas de alimentação, potência do plasma e remoção de escória (MOUNTOURIS et. al, 2006).

O syngas produzido pela tecnologia de gaseificação a plasma pode ser usado para a produção de eletricidade e/ou calor útil. Para que o syngas possa ser devidamente aproveitado é necessário associar o sistema de gaseificação a plasma ao MCI ou CTG.

Segundo Minutillo (2009), o syngas é resfriado e limpo antes de ser utilizado como combustível em um ciclo MCI ou CTG. Desta forma, o ciclo combinado tanto com MCI quanto com CTG deve ter um sistema de resfriamento e limpeza logo após o gaseificador a plasma.

A gaseificação a plasma ganhou destaque devido a produção de syngas e potencial de geração de eletricidade, nos últimos anos, uma vez que os custos entraram em uma faixa comercialmente competitiva. Uma planta de gaseificação a plasma em Utashinai, Japão, está em operação desde 2002 e, a partir de 2014, gaseifica 268 toneladas de resíduos sólidos municipais por dia e, produzindo 7,9 MWh de eletricidade (SIKARWAR et. al, 2016).

A tecnologia de gaseificação a plasma também pode ser utilizada para processar resíduos de efluentes. A Westinghouse Plasma construiu, em 2002, uma planta de gaseificação a plasma que atende as cidades de Mihama e Mikata (Japão), tratando 20 t/dia de RSU e 4 t/dia de lodo de esgoto. O syngas são convertidos em calor para a secagem do lodo de esgoto antes da gaseificação. E o maior gaseificador a plasma existente até o momento (970 t/dia) foi construído pela Westinghouse Plasma e montada pela Air Products em Billingham perto de Stockton-on-Tees no Reino Unido (HRABOVSKY e VAN DER WALT, 2017).

De acordo com Hrabovsky e Van der Walt (2017), as principais vantagens do gaseificador a plasma em relação aos demais são:

- Uma ampla gama de resíduos orgânicos e biomassa, incluindo frações de resíduos biodegradáveis, podem ser usadas para gaseificação;
- A temperatura no reator pode ser facilmente controlada, regulando a potência do plasma e a taxa de alimentação do material;
- Devido às temperaturas suficientemente altas, a distribuição homogênea de calor pode ser facilmente mantida em todo o reator, contribuindo para a substancial redução da produção de alcatrão e outras moléculas complexas, e a produção de gás de síntese alta qualidade;
- Alta densidade de energia e alta eficiência de transferência de calor podem ser alcançadas, permitindo tempos de residência mais curtos e taxas de transferência de calor maiores;

As principais limitações são o alto custo de construção, manutenção e operação, devido ao elevado consumo de eletricidade para gerar plasma, resultando em baixa eficiência geral (SIKARWAR et. al, 2016).

De acordo com Munir et. al (2019), os parâmetros operacionais que afetam a gaseificação do plasma são a temperatura de reação do gaseificador (aproximadamente 2.000-14.000 °C), o tempo de residência (menos de 30min a 3h), as vazões do gás de plasma, oxidante e correntes de vapor. Temperatura de reação mais alta durante a gaseificação do plasma aumenta a gaseificação do resíduo, produz conteúdo limitado de alcatrão (menos de 10 mg/Nm³) no gás de síntese, produz mais conteúdo de energia líquida com maior entalpia de combustão e requer um reator de menor volume, além disso uma taxa de fluxo de plasma mais baixa pode ser suficiente para o rendimento desejado de gaseificação. Um tempo de residência mais curto é melhor para obter uma composição de gás de síntese mais simples e estável. A fonte do gás de plasma é crítica para a composição do gás de síntese. Por exemplo, o plasma com N₂ produz mais gás H₂, enquanto o plasma do vapor produz CO e H₂. Um agente oxidante é necessário para uma maior conversão de carbono em gás de síntese. E a adição de vapor na gaseificação a plasma aumenta o poder calorífico do gás de síntese de 9,3 para 10,2 MJ/m³, o rendimento do gás de síntese e conversão de carbono fixo.

2.2.6.4 Gaseificação a plasma do resíduo sólido do serviço de saúde

Com o aumento do número de unidades de saúde e a ocorrência da pandemia de COVID-19, os resíduos sólidos do serviço de saúde (RSS) tornaram-se uma questão importante em relação aos riscos à saúde, poluição ambiental e sustentabilidade. As taxas de produção de RSS em hospitais aumentaram em até 280 toneladas/dia durante a pandemia. Esses resíduos requerem armazenamento frio e ventilado, altos custos de descarte para os hospitais, controle rigoroso de emissões de poluentes para municípios, etc. Durante o tratamento do RSS por processos convencionais de incineração, altos teores de dibenzo-p-dioxinas e dibenzofuranos policlorados (que são declarados cancerígenos, podem poluir o ar e os aterros sanitários, reduzindo a qualidade do solo) são emitidos para o meio ambiente por seus gases de escape (77–894 ng/m³) e cinzas residuais (69–4915 µg/m³). Especialmente no caso do surto de COVID-19, deve-se considerar que a atividade viral em superfícies pode durar até 72 h. A OMS recomenda o tratamento em alta temperatura no local antes do descarte desses resíduos para reduzir os riscos de infecção durante o transporte e armazenamento, o que traz riscos extras de infecção e custos de tratamento. Por outro lado, o RSS contém fisicamente até 54% de papel,

20% de têxtil, 26% de orgânico, 50% de plástico, 10% de metal e 15% de resíduos contendo vidro, enquanto consiste em até 35% de carbono, 15% de hidrogênio, 16% de nitrogênio, 26% de oxigênio, 1% de enxofre e 3% de cloro, com um poder calorífico máximo de 8820 kcal/kg. Portanto, as características do RSS apresentam muitas semelhanças com os resíduos sólidos urbanos (RSU), que podem ser utilizados para a produção de energia. Além disso, esses resíduos podem ser usados como combustíveis se forem desenvolvidas opções de descarte mais ecológicas, saudáveis e sustentáveis (ERDOGAN et. al, 2021).

Existem vários estudos experimentais e numéricos na literatura sobre o tratamento de RSU via processo de gaseificação a plasma e produção de H₂, enquanto há estudos limitados sobre RSS. A principal limitação para alternativas de gaseificação a plasma é a dificuldade de projeto do gaseificador, pois há uma grande variedade de composições de RSS e parâmetros operacionais, exigindo uma série de experimentos para cada projeto específico de gaseificador (ERDOGAN et. al, 2021).

De um modo geral, a maioria das instalações de tratamento de plasma térmico existentes tratam resíduos sólidos urbanos, cinzas de incineração e outros resíduos perigosos. A alta adaptabilidade da matéria-prima à tecnologia de plasma térmico implica que essas plantas também tenham a capacidade de tratar resíduos médicos. Isso pode ser demonstrado pelos múltiplos fluxos de resíduos, incluindo resíduos médicos em algumas fábricas. Enquanto isso, os estudos sobre o tratamento com plasma térmico de resíduos médicos são menores do que os de outros tipos de resíduos (por exemplo, RSU e cinzas). Nos estudos existentes, o processo pode ser categorizado em combustão a plasma, pirólise a plasma, gaseificação a plasma e vitrificação a plasma. A maioria dos processos se concentrava não apenas em resíduos médicos, mas também em outros tipos de resíduos perigosos. Atualmente, a gaseificação a plasma com fonte de alimentação CC tem o mais alto nível de comercialização. Embora uma variedade de investigações tenha se concentrado na aplicação da tocha de plasma AC, a maioria delas não é comercializada. Ainda existem poucas plantas de gaseificação a plasma que tratam o RSS, mas a Tabela 2 mostra as comparações entre algumas instalações de tratamento de plasma térmico e processos em escala de laboratório, piloto e comercial para resíduos médicos em todo o mundo (CAI, 2020).

Tabela 2 – Instalações de tratamento de plasma térmico e processos em escala de laboratório para resíduos médicos

(continua)

Ano	Local	Escala	Resíduo	Capacidade	Unidade de plasma	Pós-processamento	Saída
2000	-	demonstração	RSS, lodo de águas residuais, etc.	64 kg/h	Pirólise e vitrificação, N ₂ ou ar como gás de plasma, tocha de plasma não transferido CC	Purificador de gases, tratamento de águas residuais, oxidante térmico	Redução na emissão de poluentes; águas residuais; escória
2001	Kapolei, Honolulu, Hawaii, USA	comercial	RSS	1 t/d	gaseificação	-	Syngas para fornecer energia ao forno
2002	Rússia	-	RSS perigosos	150 - 250 kg/h	Combustão em forno rotativo, ar como gás de plasma, duas tochas de plasma CA	Pós-combustor, lavador a seco, extintor, trocador de calor, lavador úmido, etc.	Gás de saída contendo CO ₂ , H ₂ O, HCl, HF e SO ₂ ; escória; recuperação de calor
2002	India	Laboratorial	RSS	25 kg/h	Pirólise em uma câmara inclinada, N ₂ como gás de plasma, vapor ou ar como oxidante, tocha de plasma CC	Câmara secundária, sistema de tempera e lavagem	Gás residual contendo CO ₂ , H ₂ O, CO, hidrocarbonetos, NO _x , SO ₂ , etc.

Tabela 2 – Instalações de tratamento de plasma térmico e processos em escala de laboratório para resíduos médicos

(continuação)							
Ano	Local	Escala	Resíduo	Capacidade	Unidade de plasma	Pós-processamento	Saída
2004	-	demonstração	RSS	40 kg/h	Combustão em um reator de tubo inclinado, O ₂ como gás de plasma, tocha de plasma DC	Ciclone, depurador, etc.	Gás residual contendo CO ₂ , H ₂ O, etc.; escória
2005	-	piloto	RSS	50 - 100 kg/h	Combustão em um forno integrado, N ₂ como gás de plasma e ar como oxidante, tocha de plasma CC	Duto secundário de combustão, duto para descarga de gás, unidade de bocal, sistema de limpeza, etc.	Gás residual contendo CO ₂ , N ₂ , O ₂ e CO, etc.; escória
2008	Liquan, Shaanxi, China	-	RSS, resíduos orgânicos persistentes	5 t/d	-	-	-
2008	China	piloto	RSS e resíduos perigosos	5 t/d	Pirólise, H ₂ como gás de plasma, tocha de plasma CA	Trocador de calor, adsorvedor, purificador, câmara de combustão secundária, etc.	Gases de saída; escória; recuperação de calor

Tabela 2 – Instalações de tratamento de plasma térmico e processos em escala de laboratório para resíduos médicos

(continuação)

Ano	Local	Escala	Resíduo	Capacidade	Unidade de plasma	Pós-processamento	Saída
2009	Zi gong, Sichuan, China	piloto	resíduos químicos	-	Pirólise, Ar como gás de plasma, tocha de plasma CA	Incinerador de gás, torre de pulverização, torre de lavagem, purificador de refrigerante, etc.	Gases e escórias
2013	Rússia	piloto	Madeira, RSS, resíduos de aves e gado.	50 kg/h	Gaseificação, vapor como gás de plasma e agente de gaseificação, tocha de plasma CC	Torre de resfriamento, sistema de filtro trocador de calor	Syngas
2013	Shanghai, China	comercial	RSS	60 kg/h	gaseificação	-	Syngas, escória

Tabela 2 – Instalações de tratamento de plasma térmico e processos em escala de laboratório para resíduos médicos

							(conclusão)
Ano	Local	Escala	Resíduo	Capacidade	Unidade de plasma	Pós-processamento	Saída
2014	Shanghai, China	comercial	RSS, cinzas volantes	30 t/d	gaseificação	Segundo combustor, caldeira de calor residual, precipitador eletrostático, torre de reação seca	Syngas ou vapor, escória
2018	Rússia	Laboratorial	RSS	0,4 kg	Gaseificação, vapor ou ar como gás de plasma	Unidade de refrigeração, filtro de mangas	Syngas
2019	Ahmedabad, India	comercial	RSS	15 - 20 kg/h	Pirólise	Câmara secundária, venturi, purificador	Gás residual contendo uma pequena quantidade de partículas, CO, SO ₂ , H ₂ S, NO ₂ , Cl ₂

Fonte: CAI (2020)

Uma simulação do processo de gaseificação a plasma foi realizado por Messerle et. al (2018), considerando uma composição química de tecido ósseo (resíduo sólido do serviço de saúde -RSS) e resíduo doméstico (RD), conforme apresentado na Tabela 3, utilizando ar e vapor de água como oxidante. Nessas condições, a composição química do gás produzido e o menor poder calorífico são obtidos de acordo com a temperatura e a produção máxima de CO e H₂, conforme apresentados na Tabela 4.

Tabela 3 – Composição química de TO e RD, wt.%

Resíduo	C	H	O	N	S	Cl
RSS	9.00	2.21	1.99	4.00	1.00	-
RD	34.15	5.85	6.29	8.16	0.94	5.3

Fonte: Messerle et. al (2018)

Tabela 4. Concentração de gases, vol%

Temperatura	RSS (ar)	RSS (vapor)	RD (ar)	RD (vapor)
	1300 K		1600 K	
CO	28.7	38.1	31.7	33.6
H ₂	24.7	46.8	50.9	60.8
CH ₄	0.01	0.2	-	-
CO ₂	2.46	0.25	0.13	0.13
H ₂ O	3.72	0.25	0.13	0.13
LHV [kJ/kg]	3510	5664	13620	18497

Fonte: Messerle et. al (2018)

2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DO SERVIÇO DE SAÚDE DO BRASIL

No Brasil, existem poucas publicações sobre a composição do RSS, devido à sua heterogeneidade e seu caráter patogênico. Isso apresenta um grau de dificuldade maior e limita o desenvolvimento de novas pesquisas. Neste trabalho foram considerados 2 estudos de caracterização do RSS. Um foi realizado num hospital da cidade de São Carlos, interior do estado de São Paulo (GIL, 2007) e outro num hospital da cidade de Florianópolis, estado de Santa Catarina (VILHENA, 2018). Neste último foram considerados os resíduos produzidos em diferentes centros hospitalares: na enfermaria, no centro cirúrgico e nos “outros” que abrangem pronto-socorro, laboratórios e administração. A análise elementar (CHON) e

imediate (umidade, cinzas) do RSS, e a composição média considerando todos os locais (hospital, enfermaria, centro cirúrgico, outros) e o desvio padrão estão dispostos conforme Tabela 5.

Tabela 5: Composição elementar do RSS do Brasil (%)

Componentes	Hospital	Enfermaria	Centro Cirúrgico	Outros	Média	Desvio padrão
C	35,73	30,80	27,90	32,00	31,6	1,6
H	3,87	3,60	3,90	3,60	3,74	0,08
S	0,00	0,00	0,50	0,30	0,20	0,12
Cl	0,32	0,08	0,09	0,09	0,15	0,06
N	0,51	0,50	0,38	0,64	0,51	0,05
O	37,40	36,72	28,13	47,07	37,3	3,9
H ₂ O	18,33	24,10	28,60	12,20	20,8	3,6
Cinzas	9,03	4,20	10,50	4,10	7,0	1,7

Fonte: Gil (2007) e Vilhena (2018)

3 DIMENSIONAMENTO DO GASEIFICADOR A PLASMA

Este capítulo aborda o dimensionamento do gaseificador a plasma, para isto é apresentada uma sequência de equações para a determinação do ponto de operação, da potência requerida na tocha e é estimado o tempo de destruição do RSS. Após a obtenção destes parâmetros, são apresentadas equações para determinar o diâmetro e altura interna do gaseificador, diâmetro de entrada do RSS, diâmetro de saída do gás (syngas) e diâmetro de saída das cinzas, espessura do isolamento térmico, e diâmetro e altura total do gaseificador.

3.1 PONTO DE OPERAÇÃO DO GASEIFICADOR A PLASMA

A primeira etapa do dimensionamento do gaseificador é determinar o melhor ponto de operação e conseqüentemente a composição do gás (syngas) produzido no processamento de resíduos sólidos do serviço de saúde, e para isso é considerado o regime de equilíbrio termodinâmico.

Existem dois métodos mais usados nos cálculos da composição de um sistema em equilíbrio termodinâmico. O primeiro método é baseado na lei de conservação de massa e usa constantes de equilíbrio. Nesse caso, não importa o caminho percorrido pelo processo, é apenas importante o estado inicial e final do sistema. Onde as transformações químicas são apresentadas na forma de reações reversíveis de dissociação de substâncias em elementos. O segundo método de cálculo da composição de equilíbrio é baseado na busca pela entropia máxima ou energia de Gibbs mínima. Neste caso, um sistema termodinâmico é considerado como um conjunto de substâncias individuais sem considerar as reações químicas. Os valores extremos das funções características (entropia ou energia de Gibbs) são determinados para todas as fases. Nesse caso, devem ser consideradas as leis de conservação de massa, da carga (no caso do plasma) e da equação de estado. Desta forma, encontra-se o extremo das funções características e obtém a composição do sistema e aplica-se o método dos multiplicadores indefinidos de Lagrange. Tendo compilado a função de Lagrange e tomando as derivadas parciais em relação a todas as variáveis, obtém-se um sistema de equações que pode ser resolvido pelo método das aproximações sucessivas. Este método foi aplicado neste trabalho utilizando a simulação no software TERRA.

O softwares TERRA é baseado no princípio de maximizar entropia para sistemas termodinâmicos isolados em equilíbrio. O TERRA tem seu próprio banco de dados de propriedades termoquímicas para mais de 3.000 agentes químicos para uma faixa de temperatura de 300 a 6.000 K. O banco de dados contém propriedades termoquímicas de

componentes ionizados e gás de elétron, que são levadas em consideração nos cálculos termodinâmicos.

Para simular o processo de gaseificação considerando equilíbrio termodinâmico foram utilizados os valores médios dos elementos da matéria-prima (RSS) submetendo a variação da temperatura de 300 a 2300 K a pressão atmosférica. Tal variação de temperatura foi escolhida, pois para as temperaturas mais elevadas o rendimento da energia do gás (syngas) diminui.

O rendimento da energia do gás (α) é uma relação entre a energia química contida no gás de síntese (calculada pelo seu poder calorífico inferior, $PCI_{gás}$) e a energia gasta no processo, avaliada pela variação da entalpia do sistema termodinâmico, e é determinado pela equação (3.1).

$$\alpha = \frac{PCI_{gás}}{\Delta H} \quad (3.1)$$

Onde:

$PCI_{gás}$: poder calorífico inferior do gás [kJ/kg]

α : rendimento da energia do gás [-]

ΔH : diferença de entalpia [kJ/kg], i.e. a energia necessária para aquecimento de 1 kg de RSS do estado inicial até o final.

O poder calorífico inferior do gás para cada temperatura foi determinado a partir da respectiva composição do gás, conforme equação (3.2):

$$PCI_{gás} = \sum X_i PCI_i \quad (3.2)$$

Onde:

$PCI_{gás}$: poder calorífico inferior do gás (syngas) [kJ/kg]

PCI_i : poder calorífico inferior do i-ésimo componente [kJ/kg]

X_i : fração mássica do i-ésimo componente [-]

O PCI_i é o poder calorífico inferior do i-ésimo componente da mistura (H_2 , CO , CH_4). O PCI de H_2 , CO e CH_4 são 120000, 11084 e 50023 kJ/kg, respectivamente (XAVIER, 2016).

O melhor ponto de operação é obtido analisando a variação do rendimento alfa com a temperatura de processamento, utilizando o gráfico $\alpha \times temperatura$, onde se determina a

temperatura de processamento do RSS considerando o rendimento de energia do gás máximo $\alpha_{m\acute{a}x.}$.

3.2 POTÊNCIA REQUERIDA NA TOCHA DE PLASMA

O diâmetro da tocha de plasma pode ser adaptado conforme necessidade de projeto do gaseificador e se limita pelo *design* do eletrodo e do sistema de refrigeração. Então, o que se torna importante é determinar a potência total requerida pela(s) tocha(s) a ser instalada(s), conforme equação (3.3).

$$E_{tocha} = \frac{\dot{m}_{RSS} \cdot \Delta H}{\eta_{tocha}} \quad (3.3)$$

Onde:

E_{tocha} : potência elétrica da tocha [kW]

\dot{m}_{RSS} : fluxo mássico de RSS [kg/s]

ΔH : diferença de entalpia [kJ/kg], i.e. a energia necessária para aquecimento de 1 kg de RSS do estado inicial até o final.

Nas instalações de um gaseificador a plasma pode-se usar mais de uma tocha simultaneamente e assim colocar tochas com menor potência e que possuam geometrias menos robustas. Desta forma, para calcular a potência de cada tocha utilizada no reator é utilizada a equação (3.4).

$$E_{tocha.unit} = \frac{E_{tocha}}{N_{tocha}} \quad (3.4)$$

Onde:

$E_{tocha.unit}$: potência elétrica em cada tocha [kW]

N_{tocha} : número de tochas [-]

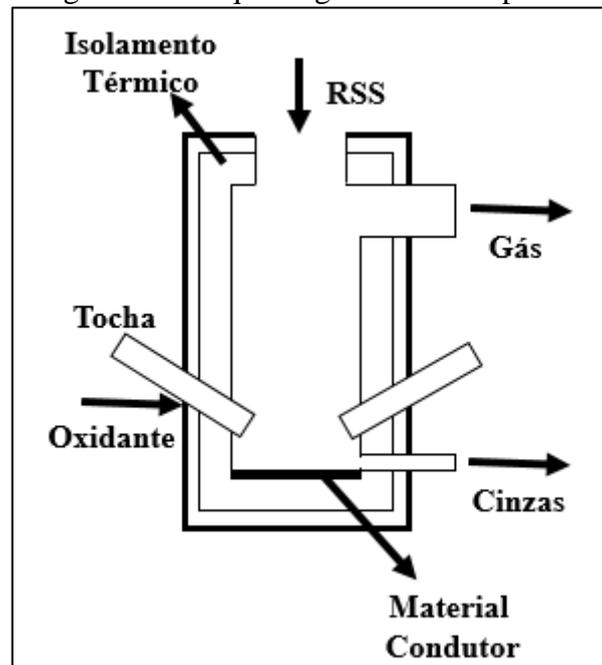
A eficiência térmica da tocha a plasma, η_{plasma} , para transformar energia elétrica em térmica, depende do projeto e do tipo da tocha a plasma. A eficiência térmica média da tocha de plasma de arco não-transferido é de 70%. Tal tipo de tocha requer uma taxa de fluxo de gás de formação de plasma relativamente alta que é necessário para estabilizar o arco elétrico, e é

adequada para fornecer oxidante (ou outro gás reagente) no gaseificador. Por outro lado, a tocha a plasma de arco transferido tem eficiência térmica de 95% e requer o fluxo de gás muito pequeno. Tais tipos de tochas são mais adequadas para o processo de pirólise. Para este trabalho considera a tocha de arco transferido, e portanto o processo de pirólise. A tocha de arco transferido exige um meio condutor ou um eletrodo externo para fechar o circuito elétrico (TIWARI et al., 2019).

3.3 DIÂMETRO E ALTURA INTERNA DO GASEIFICADOR A PLASMA

Para o dimensionamento do gaseificador a plasma é considerada a geometria cilíndrica, com entrada de RSS na tampa do reator (parte superior), a(s) tocha(s) de plasma posicionadas na região inferior, a saída de cinzas (parte inorgânica do resíduo, fundida a temperaturas do plasma) na lateral inferior e a saída de gás na lateral superior, conforme representação do croqui na figura 4.

Figura 4 – Croqui do gaseificador a plasma



Fonte: Elaborado pelo autor

A determinação do diâmetro e altura interna do reator está em função da taxa de processamento de RSS. Para isso é necessário considerar a quantidade de RSS (em kg/s) que estarão dipostos em sacos de lixo hospitalar normatizado com os padrões da ABNT e o tempo de residência do RSS no gaseificador a plasma.

A capacidade de processamento do RSS é o fluxo mássico de resíduo, conforme equação (3.5):

$$CP_{RSS} = \dot{m}_{RSS} = \rho_{RSS} \cdot V_{RSS} \cdot A_t \quad (3.5)$$

Onde:

A_t : área da tampa do gaseificador [m²]

CP_{RSS} : capacidade de processamento do RSS [kg/s]

\dot{m}_{RSS} : fluxo mássico de RSS [kg/s]

V_{RSS} : velocidade do RSS [m/s]

ρ_{RSS} : massa específica de RSS [kg/m³]

O tempo de residência do RSS no gaseificador com geometria cilíndrica (que se assemelha a uma tubulação) pode ser descrito pela equação (3.6). De acordo com Munir et al. (2019), o tempo de residência dos resíduos sólidos municipais no gaseificador a plasma varia de 30 minutos a 3 horas. Como não há estudos específicos para a gaseificação a plasma para resíduos sólidos do serviço de saúde, para este trabalho será adotado o tempo de residência de 30 minutos. Assim, o tempo de processamento está ligado diretamente com a altura interna do reator e a velocidade de processamento.

$$t_r = \frac{H_i}{V_{RSS}} \quad (3.6)$$

Logo,

$$H_i = t_r \cdot V_{RSS} \quad (3.7)$$

Rearranjando a equação (3.5), tem-se:

$$V_{RSS} = \frac{\dot{m}_{RSS}}{\rho_{RSS} \cdot A_t} \quad (3.8)$$

Onde:

A_t : área da tampa do gaseificador [m²]

H_i : altura interna do gaseificador [m]

\dot{m}_{RSS} : fluxo mássico de RSS [kg/s]

t_r : tempo de residência do RSS no gaseificador [s]

V_{RSS} : velocidade do RSS [m/s]

ρ_{RSS} : massa específica de RSS [kg/m³]

Substituindo (3.6) e (3.8) em (3.7) obtém-se a equação (3.9) que determina a altura interna do gaseificador a plasma para resíduo sólido do serviço de saúde. A altura interna está em função do diâmetro interno do reator, H_i , e este deve ser estimado de forma que a relação $H_i/D_i \geq 2$, para que o RSS possa aproveitar o máximo do calor do gás (syngás) durante sua descida dentro do reator até passar pelas tochas a plasma. Isso faz com que diminua o consumo de energia nas tochas para o processamento do RSS. E ainda que o diâmetro interno do reator deve ser maior ou igual ao diâmetro de entrada do RSS, $D_i \geq d_1$, para que se garanta que reator comporte a alimentação do maior saco de RSS normatizado com os padrões da ABNT compactado (tabela 6).

$$H_i = \frac{4\dot{m}_{RSS} \cdot t_r}{\pi \cdot \rho_{RSS} \cdot D_i^2} \quad (3.9)$$

Onde:

A_t : área da tampa do gaseificador a plasma [m²]

CP_{RSS} : capacidade de processamento de RSS [kg/s]

D_i : diâmetro interno do gaseificador a plasma [m]

H_i : altura interna do gaseificador a plasma [m]

\dot{m}_{RSS} : fluxo mássico de RSS [kg/s]

t_r : tempo de residência do RSS no gaseificador [s]

V_{RSS} : velocidade do RSS [m/s]

ρ_{RSS} : massa específica do RSS [kg/m³]

De acordo com Silva e Hoppe (2005) a massa específica do RSS, produzido pelos 11 municípios localizados na bacia hidrográfica do rio Vacacaí, situada na região central do estado do Rio Grande do Sul, é de 150 kg/m³. Os estudos deste trabalho são baseados na composição do RSS do Brasil, então é considerado a massa específica de 150 kg/m³.

3.4 DIÂMETRO DE ENTRADA DO RESÍDUO SÓLIDO DO SERVIÇO DE SAÚDE (d_1)

Os RSS normalmente são depositados em saco de lixo hospitalar infectante constituído em polietileno de alta densidade. Este produto é normatizado com os padrões da ABNT NBR 9191/7500 (2021) e pode ser comercializados nos seguintes volumes (\forall_{RSS}) e respectivas dimensões (largura (L) x altura ($h_{saco.RSS}$)), conforme tabela 6.

Tabela 6 – Dados de saco de lixo hospitalar

Volume [l]	Largura (L) [cm]	Altura (h_{RSS}) [cm]	Capacidade [kg]
15	39	58	3
30	59	62	6
50	63	80	10
90	92	90	18
100	75	105	20

Fonte: ABNT NBR 9191/7500 (2021)

Para alimentar o gaseificador é considerado que o saco contendo os resíduos não será aberto, da forma que for coletado será colocado no gaseificador. Neste caso, será necessário compactar o saco de RSS de forma a reduzir o seu volume e ar contido nele (para evitar a oxidação). De acordo com IBAM (2021), a compressividade do lixo situa-se entre 1:3 e 1:4 para uma pressão equivalente a 4 kg/cm² e que tais valores são utilizados para dimensionamento de equipamentos compactadores. Desta forma, para este trabalho é considerado a compactação de 1:4. Assim, sabendo a massa específica do RSS e a massa que há no saco é determinado o volume do saco de RSS compactado através da equação (3.10).

$$\forall_{RSS.c} = \frac{1}{4} \left(\frac{m_{RSS.s}}{\rho_{RSS}} \right) \quad (3.10)$$

Onde:

$m_{RSS.s}$: massa de RSS por saco [kg]

$\forall_{RSS.c}$: volume do saco de RSS compactado [m³]

ρ_{RSS} : massa específica do RSS [kg/m³]

A geometria do saco de RSS após compactação é considerada cilíndrica, desta forma o volume do saco de RSS de acordo com as dimensões geométricas é obtida através da equação (3.11).

$$\forall_{RSS.c} = \frac{\pi}{4} d_1^2 \cdot h_{RSS.c} \quad (3.11)$$

Onde,

$$h_{RSS.c} = \frac{1}{4} h_{RSS} \quad (3.12)$$

Onde:

d_1 : diâmetro de entrada de RSS [m]

h_{RSS} : altura do saco de RSS [m]

$h_{RSS.c}$: altura do saco de RSS compactado [m]

$\forall_{RSS.c}$: volume do saco de RSS compactado [m³]

Substituindo a equação (3.12) em (3.11), igualando a equação (3.10) e rearranjando obtém-se a equação (3.13) que determina o diâmetro de entrada do RSS.

$$d_1 = \left(\frac{4m_{RSS.s}}{\pi \cdot \rho_{RSS} \cdot h_{RSS}} \right)^{1/2} \quad (3.13)$$

Onde:

d_1 : diâmetro de entrada de RSS [m]

h_{RSS} : altura do saco de RSS normalizado com os padrões da ABNT NBR [m]

$m_{RSS.s}$: massa de RSS por saco [kg]

ρ_{RSS} : massa específica do RSS [kg/m³]

Quando há possibilidade de ter mais de uma entrada de RSS, é determinado o número máximo de entradas de sacos de RSS ($N_{saco.RSS}$) considerando a relação entre quadrado do diâmetro interno do gaseificador e o produto do quadrado do diâmetro de entrada do RSS e o fator de segurança, conforme equação (3.14). O fator de segurança utilizado é de 2,5 para garantir uma distribuição regular das entradas de RSS no gaseificador.

$$N_{saco.RSS} = \frac{(D_i)^2}{(d_1)^2 \cdot FS} \quad (3.14)$$

Onde:

d_1 : diâmetro de entrada de RSS [m]

D_i : diâmetro interno do gaseificador a plasma [m]

FS : fator de segurança [-]

$N_{saco.RSS}$: número máximo de entradas de sacos de RSS [-]

3.5 DIÂMETRO DE SAÍDA DAS CINZAS (d_2)

O diâmetro de saída das cinzas é determinado considerando a equação (3.15) do fluxo mássico e aplicando um fator de segurança de 3 para evitar possível congestionamento da seção de saída das cinzas.

$$\dot{m}_{cinzas} = \rho_{cinzas} \cdot V_{cinzas} \cdot A_{cinzas} \quad (3.15)$$

Onde,

$$A_{cinzas} = \frac{\pi d_2^2}{4} \quad (3.16)$$

Substituindo a equação (3.16) na (3.15) e rearranjando, tem-se a equação para determinar o diâmetro de saída das cinzas, conforme equação (3.17).

$$d_2 = \left(\frac{4\dot{m}_{cinzas}}{\pi\rho_{cinzas}V_{cinzas}} \right)^{1/2} \cdot FS \quad (3.17)$$

Onde:

d_2 : diâmetro de saída de cinzas [m]

FS : fator de segurança [-]

\dot{m}_{cinzas} : fluxo mássico de cinzas [kg/s]

V_{cinzas} : velocidade de escoamento de cinzas [m/s]

ρ_{cinzas} : massa específica das cinzas [kg/m³]

O fluxo mássico de gás e cinzas é determinado de acordo com a quantidade de RSS processada e são calculados utilizando a conservação de massas através da equação (3.18).

$$\dot{m}_{RSS} + \dot{m}_{oxidante} = \dot{m}_{gás} + \dot{m}_{cinzas} \quad (3.18)$$

De acordo com Dilawari et al. (1977), a velocidade de escoamento da escória (cinzas) em uma unidade de escala industrial varia de 5 a 10 cm/s. Para este trabalho é utilizada a velocidade de 7,5 cm/s. De acordo com experimento de Chu (1998), a massa específica das cinzas resultante da gaseificação a plasma varia de 2600 a 2940 kg/m³, para este trabalho é adotado o valor médio de 2770 kg/m³.

O gaseificador a plasma que utiliza tocha de arco transferido necessita de um material condutor que serve como anodo ao fundo do reator. Para este trabalho é considerado que a espessura da camada de material condutor é de 5 mm. E o diâmetro de saída das cinzas estará localizado logo acima camada superficial do material condutor.

3.6 DIÂMETRO DE SAÍDA DO GÁS (d_3)

A determinação do diâmetro de saída de gás segue o mesmo princípio da seção 3.5, conforme equação (3.19) e estará localizado na parte superior do gaseificador, rente à parede superior de isolamento.

$$d_3 = \left(\frac{4\dot{m}_{gás}}{\pi\rho_{gás}V_{gás}} \right)^{1/2} \quad (3.19)$$

Onde:

d_3 : diâmetro de saída do gás [m]

$\dot{m}_{gás}$: fluxo mássico de gás [kg/s]

$V_{gás}$: velocidade do gás [m/s]

$\rho_{gás}$: massa específica do gás [kg/m³]

De acordo com a simulação apresentada no trabalho de Erdogan et al. (2021), a velocidade do gás (syngás) dentro do gaseificador está na faixa de 40 a 60 m/s. Para este trabalho é utilizado o valor médio de 50 m/s.

A massa específica do gás pode ser determinada relacionando com o seu volume específico (propriedade determinada de acordo com o ponto de operação), conforme equação (3.20).

$$\rho_{gás} = \frac{1}{v_{gás}} \quad (3.20)$$

Onde:

$\rho_{gás}$: massa específica do gás [kg/m³]

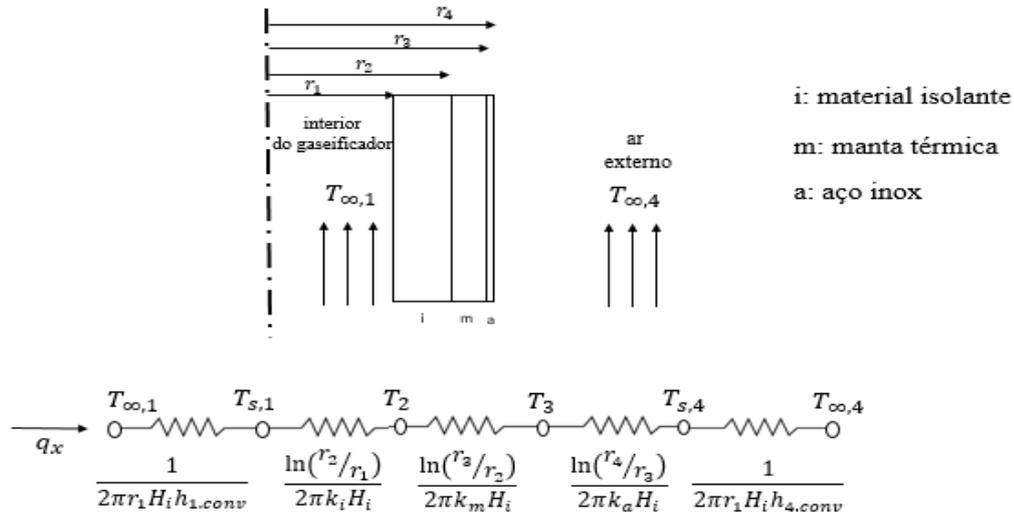
$v_{gás}$: volume específico do gás [m³/kg]

O volume específico do gás (syngas) para cada temperatura e respectiva composição é obtido através da simulação no software TERRA, considerando o método de cálculo da composição de equilíbrio baseado na busca pela entropia máxima ou energia de Gibbs mínima. E o volume específico do gás utilizado na equação (3.20) é o que corresponde à temperatura e composição do gás no ponto de operação.

3.7 ESPESSURA DO SISTEMA DE ISOLAMENTO

De acordo com Godoy (2001), o isolamento térmico de um reator usando plasma deve ser feito com refratários que suportam altas temperaturas e em seu trabalho indica o uso de material refratário e o material isolante, e a parte exposta à atmosfera em aço. Mas, tendo em vista que o material refratário é de alto custo para gaseificador a plasma e a espessura normalmente é muito menor do que o material isolante; para este trabalho o isolamento térmico é realizado com material isolante (placa cerâmica), manta térmica (para compensar possível dilatação térmica) e o revestimento externo em aço inox, conforme figura 5.

Figura 5 – Sistema de isolamento térmico do gaseificador a plasma.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para determinar a espessura de cada elemento do sistema de isolamento térmico, pode-se utilizar circuitos térmicos equivalentes para paredes compostas. Para este trabalho é considerado que há gradientes de temperatura somente na direção radial, desta forma o sistema pode ser analisado como unidimensional. De acordo com Incropera (2008), a taxa de transferência de calor unidimensional é representada pela equação (3.21).

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\frac{1}{2\pi H_i h_{1,conv}} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_i H_i} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_m H_i} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_a H_i} + \frac{1}{2\pi H_i h_{4,conv}}} \quad (3.21)$$

Onde:

$$r_1 = \frac{D_i}{2} \quad (3.22)$$

$$r_2 = r_1 + e_i \quad (3.23)$$

$$r_3 = r_2 + e_m \quad (3.24)$$

$$r_4 = r_3 + e_a \quad (3.25)$$

Godoy (2001) considera em seu trabalho que a temperatura da superfície externa do reator é de 473 K. Mas, para que seja possível trabalhar no entorno da instalação do gaseificador sem

causar danos aos colaboradores, é considerado que a superfície externa do gaseificador é de 323 K. O fluxo de calor perdido pelo revestimento de aço (revestimento externo) pode ser calculado pela equação (3.26).

$$q_e = h_{4.conv}A\Delta T = h_{4.conv}A(T_{s,4} - T_{\infty,4}) \quad (3.26)$$

Onde:

e_a : espessura do aço inox [m]

e_i : espessura do material isolante [m]

e_m : espessura da manta térmica [m]

$h_{1.conv}$: coeficiente de convecção do plasma [W/m².K]

$h_{4.conv}$: coeficiente de convecção livre do ar [W/m².K]

k_a : condutividade térmica do aço inox [W/m.K]

k_i : condutividade térmica do material isolante [W/m.K]

k_m : condutividade térmica da manta [W/m.K]

$T_{\infty,1}$: temperatura que o plasma atinge no interior do reator [K]

$T_{\infty,4}$: temperatura do ar externo [K]

Para determinar a espessura da manta cerâmica é considerado a conservação de energia, onde $q_e = q_x$.

De acordo com o catálogo da empresa Risotherm (2021), as placas de cerâmica tem condutividade térmica de 0,135 W/mK, e podem suportar temperaturas de até 1623 K. E ainda que a manta térmica tem condutividade térmica de 0,176 W/mK, pode resistir até temperaturas de 1273 K e pode ser encontrada nas espessuras de 13,25 e 51mm. O revestimento do gaseificador a plasma é considerado o aço inox para que aumente a durabilidade e a rigidez do reator ao ser exposto a ambientes corrosivos. A condutividade térmica do aço inox varia de 13,4-15,1 W/m.K (Feital, 2021), e para este trabalho é utilizado 14,25 W/m.K.

Nesta seção é determinada a espessura da placa de cerâmica, considerando o uso de 2 mantas térmicas de 51 mm para que se minimize a dimensão da placa cerâmica, e ainda que a placa de aço inox que reveste o reator externamente possui 3 mm.

A literatura mostra que o coeficiente de transferência de calor por convecção do plasma é da ordem de 10⁵ W/m².K (TRELLES et al., 2009; KIM et al., 2018).

3.8 ALTURA E DIÂMETRO TOTAL DO GASEIFICADOR

Para determinar a altura e diâmetro total é considerado a altura e largura interna e a espessura do sistema de isolamento, conforme equações (3.27) e (3.28), respectivamente.

$$H_{total} = H_i + 2.(e_i + e_m + e_a) \quad (3.27)$$

$$D_{total} = D_i + 2.(e_i + e_m + e_a) \quad (3.28)$$

Onde:

D_i : Diâmetro interno do gaseificador [m]

D_{total} : Diâmetro total do gaseificador [m]

e_a : espessura do aço inox [m]

e_i : espessura do material isolante [m]

e_m : espessura da manta [m]

H_i : altura interna do gaseificador [m]

H_{total} : altura total do gaseificador [m]

4 ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA

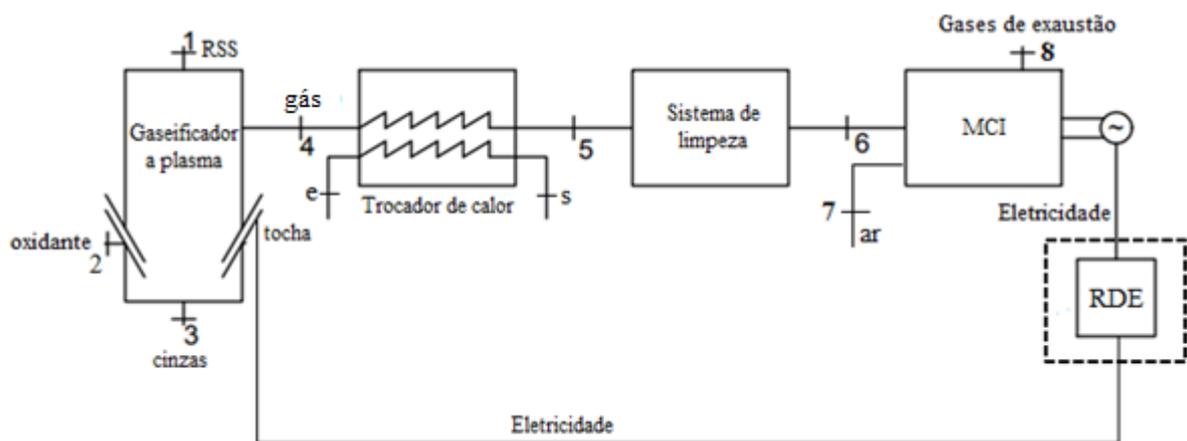
Para a realização da análise energética e exergética são consideradas duas configurações:

- Configuração 1: sistema de gaseificação a plasma associado ao motor de combustão interna.
- Configuração 2: sistema de gaseificação a plasma associado ao conjunto turbina a gás.

4.1 SISTEMA GASEIFICADOR A PLASMA ASSOCIADO AO MCI E AO CTG

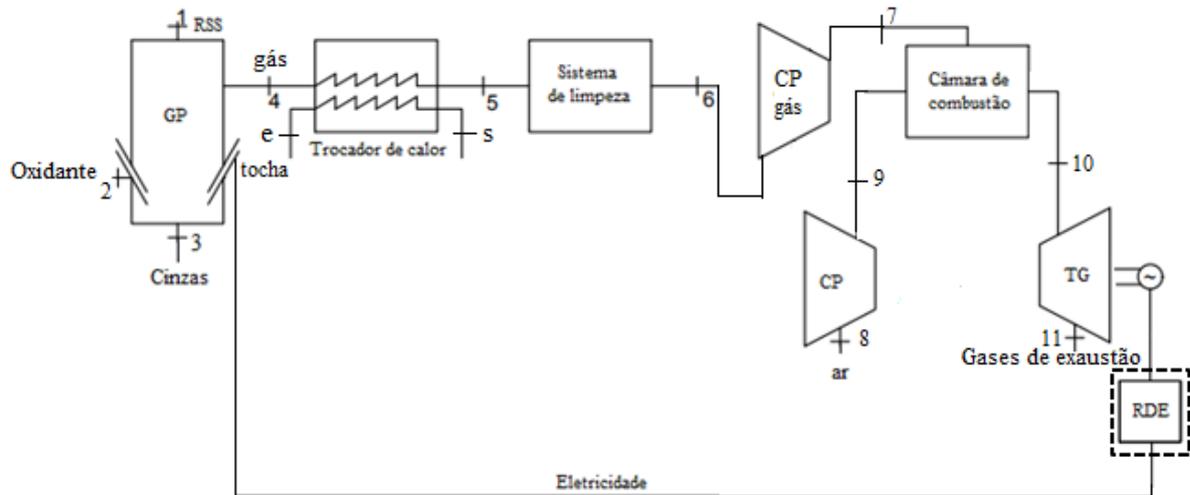
A primeira configuração estudada é o gaseificador plasma associado ao MCI. O gaseificador a plasma (GP) é alimentado por RSS, a tocha a plasma o transforma em cinzas e um gás composto por gás de síntese (CO e H_2), este passa por resfriamento num trocador de calor e levado ao sistema de limpeza e por fim queimado no MCI ou CTG para a geração de eletricidade. A potência elétrica gerada é vendida para a rede de distribuição de eletricidade (RDE) e por conseguinte a RDE fornece potência elétrica para o GP. O fluxograma do sistema associado ao MCI e CTG é apresentado na figura 6 e 7, respectivamente.

Figura 6 – Fluxograma do Sistema gaseificador a plasma associado ao motor de combustão interna



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 7 – Fluxograma do Sistema gaseificador a plasma associado ao conjunto turbina a gás



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 ANÁLISE ENERGÉTICA

Para a realização da análise termodinâmica do processamento do RSS no gaseificador a plasma, primeiramente, é considerada a composição química do gás no interior do reator, que é determinada a partir do melhor ponto de operação do gaseificador, correspondente ao maior rendimento da energia do gás, conforme seção 3.1. Considerando a composição química do RSS e do gás produzido, é aplicada a conservação de massa no gaseificador a plasma, para determinar os fluxos mássicos em cada ponto do reator e dos demais equipamentos. Com o valor do PCI e do fluxo mássico de syngas é realizada a seleção do MCI e CTG. E ainda são determinadas as propriedades dos fluxos de entrada e saída de cada equipamento, a fim de avaliar a viabilidade técnica de cada configuração considerando o potencial de geração de eletricidade e a porcentagem de energia elétrica que o MCI e TG podem suprir a necessidade da tocha a plasma. Por fim, é apresentado o diagrama de Sankey para mostrar a eficiência de cada equipamento e suas perdas.

4.2.1 Análise energética do gaseificador a plasma

As quantidades de RSS processados e gás produzido são determinados a partir da equação da conservação de massa $\left(\frac{dm}{dt} = 0\right)$ aplicada ao volume de controle representado pelo volume interno do gaseificador a plasma. Assim, os fluxos mássicos de entrada consiste na taxa de fluxo mássico de RSS (\dot{m}_{RSS}) e no fluxo mássico do gás oxidante ou do gás formador de plasma ($\dot{m}_{oxidante}$), necessário para a estabilização do arco elétrico. Na saída estão os fluxos

mássico de gases produzidos ($\dot{m}_{gás}$) e o fluxo mássico de cinzas (\dot{m}_{cinza}). A conservação de massa para o gaseificador de plasma é mostrada na Eq. (4.1)

$$\dot{m}_{RSS} + \dot{m}_{oxidante} = \dot{m}_{gás} + \dot{m}_{cinzas} \quad (4.1)$$

Onde:

$$\dot{m}_{cinzas} = \dot{m}_3: \text{fluxo mássico de cinzas [kg/s]}$$

$$\dot{m}_{gás} = \dot{m}_4: \text{fluxo mássico de gás (syngas) [kg/s]}$$

$$\dot{m}_{oxidante} = \dot{m}_2: \text{fluxo mássico de oxidante [kg/s]}$$

$$\dot{m}_{RSS} = \dot{m}_1: \text{fluxo mássico de RSS [kg/s]}$$

O último termo à direita inclui a parte inorgânica de BW, bem como as espécies condensadas formadas durante o tratamento com plasma. Sua quantidade depende da temperatura de processamento. O primeiro termo da direita inclui todos os gases oriundos do processo da gaseificação a plasma, o principal componente dos gases produzidos é syngas (mistura de CO e H₂), conforme equação (4.2).

$$\dot{m}_{gás} = \dot{m}_{syngas} + \dot{m}_{outros.gases} \quad (4.2)$$

Onde:

$$\dot{m}_{gás} = \dot{m}_4: \text{fluxo mássico de gás [kg/s]}$$

$$\dot{m}_{outros.gases}: \text{fluxo mássico de outros gases que compõe o gás [kg/s]}$$

$$\dot{m}_{syngas}: \text{fluxo mássico de gás de syngas [kg/s]}$$

O fluxo mássico de RSS é composto pela parte orgânica (\dot{m}_R) e cinzas (\dot{m}_{cinzas}), conforme equação (4.3).

$$\dot{m}_{RSS} = \dot{m}_R + \dot{m}_{cinzas} \quad (4.3)$$

Onde:

$$\dot{m}_{RSS} = \dot{m}_1: \text{fluxo mássico de RSS [kg/s]}$$

$$\dot{m}_R: \text{fluxo mássico de material orgânico [kg/s]}$$

$$\dot{m}_{cinzas}: \text{fluxo mássico de cinzas [kg/s]}$$

O poder calorífico inferior do RSS é determinado pela equação (4.4), considerando as frações mássicas de cada elemento apresentadas na seção 2.3 (EL-SALAM, 2010).

$$PCI_{RSS} = 81 \left(X_C - 3 \frac{X_O}{8} \right) + \frac{171 \cdot X_O}{8} + 345 \left(X_H - \frac{X_O}{10} \right) + 25 \cdot X_S - 6 \cdot (9 \cdot X_H + X_{H_2O}) \quad (4.4)$$

Onde:

PCI_{RSS} : Poder calorífico inferior do RSS [kJ/kg]

X_C : fração mássica de carbono [-]

X_H : fração mássica de hidrogênio [-]

X_{H_2O} : fração mássica de água [-]

X_N : fração mássica de nitrogênio [-]

X_O : fração mássica de oxigênio [-]

X_S : fração mássica de enxofre [-]

A eficiência do gaseificador é baseada na relação da energia obtida, gás, pela energia fornecida, energia do RSS e potência elétrica requerida da tocha. A equação (4.5) é utilizada para determinar a eficiência energética do gaseificador a plasma.

$$\eta_{gp} = \frac{\dot{m}_{gás} \cdot PCI_{gás}}{\dot{m}_{RSS} \cdot PCI_{RSS} + \dot{E}_{tocha}} \quad (4.5)$$

Onde:

\dot{E}_{tocha} : potência elétrica da tocha [kW]

$\dot{m}_{gás}$: fluxo mássico de gás [kg/s]

\dot{m}_{RSS} : fluxo mássico de RSS [kg/s]

$PCI_{gás}$: poder calorífico inferior do gás [kJ/kg]

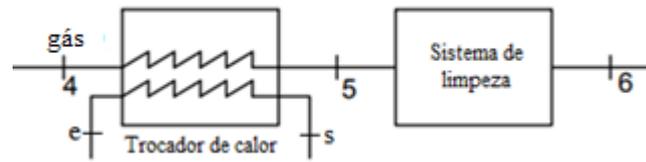
PCI_{RSS} : poder calorífico inferior do RSS [kJ/kg]

η_{gp} : eficiência energética do gaseificador a plasma [-]

4.2.2 Análise energética do trocador de calor e sistema de limpeza

A figura 8 mostra o trocador de calor e o sistema de limpeza da configuração 1 e 2.

Figura 8 – Trocador de calor e sistema de limpeza



Fonte: Elaborado pelo autor

O fluxo de gás na saída do gaseificador a plasma tem temperatura em torno de 1000 K, desta forma há necessidade de resfriá-lo para que passe pelo sistema de limpeza e em seguida seja queimado em MCI ou CTG. De acordo com Xavier (2016), a temperatura de entrada do gás no motor de combustão interna é de aproximadamente 733 K. E conforme Paulino (2014), o fluxo de gás na entrada da câmara de combustão do conjunto turbina a gás é de aproximadamente 1130 K.

Para que o gás chegue com a qualidade adequada ao MCI ou ao CTG é necessário que passe por um sistema de limpeza. O sistema de limpeza normalmente envolve a remoção de elementos compostos de enxofre, cloretos, mercúrio, outros metais voláteis e material particulado. De acordo com GIMBUN (2004), o sistema de limpeza pode operar em altas temperaturas desde que seja constituído de material refratário, mas também mostra em seu trabalho que a eficiência do sistema de limpeza de gases decresce consideravelmente há temperaturas superiores a 785 K.

Para este trabalho é considerada a temperatura de 733 K para o fluxo de gás na saída do trocador de calor para configuração 1, e 593 K para a configuração 2 (devido a necessidade de acrescentar o compressor de gás para elevar a pressão e que conseqüentemente eleva a temperatura do fluido), de forma a manter a eficiência do sistema de limpeza e temperatura adequada para entrada no MCI e CTG. A equação (4.6) apresenta a potência térmica que pode ser retirada do gás para outro fluido, de forma que a temperatura do fluxo gás na saída do trocador de calor seja de 733 K para a configuração 1, e de 593 K para a configuração 2.

$$Q_{gás} = \dot{m}_4 \cdot c_{pm.gás} \cdot (T_4 - T_5) \quad (4.6)$$

Onde:

$c_{pm.gás}$: calor específico médio a pressão constante do gás [kJ/kg.K]

\dot{m}_4 : fluxo mássico no ponto 4 do gaseificador a plasma [kg/s]

$Q_{gás}$: fluxo de calor produzido no trocador de calor pelo gás [kW]

T_4 : temperatura do gás no ponto 4 [K]

T_5 : temperatura do gás no ponto 5 [K]

O calor específico a pressão constante para cada componente do gás pode ser determinado pela aproximação polinomial, conforme equação (4.7) e coeficientes apresentados na tabela 7 (BORGNAKKE e SONNATAG, 2013).

$$C_{p_i} = A + B\theta + C\theta^2 + D\theta^3 \quad (4.7)$$

$$\theta = \frac{T(K)}{1000} \quad (4.8)$$

Tabela 7 – Coeficientes de aproximação polinomial

	A	B	C	D
H ₂	13,46	4,60	-6,85	3,79
CO	1,10	-0,46	1,00	-0,454
H ₂ O	1,79	0,107	0,586	-0,204
CO ₂	0,45	1,67	-1,27	0,394
CH ₄	1,2	3,25	0,75	-0,71
N ₂	1,11	-0,48	0,96	-0,42
O ₂	0,88	-0,0001	0,54	-0,33

Fonte: Borgnakke e Sonntag (2013)

Por meio da equação (4.9) é possível calcular o calor específico do gás produzido na gaseificação do plasma de RSS para as temperaturas T_4 e T_5 .

$$c_{p.gás} = \sum_i X_i C_{p_i}(T) \quad (4.9)$$

O calor específico a pressão constante médio do gás é determinado usando a equação (4.10).

$$c_{pm.gás} = \frac{c_{p.gás}(T_4) + c_{p.gás}(T_5)}{2} \quad (4.10)$$

Onde:

$c_{p.gás}$: calor específico do gás a pressão constante [kJ/kg.K]

$c_{p.gás(T_4)}$: calor específico do gás a pressão constante na temperatura do ponto 4 [kJ/kg.K]

$c_{p.gás(T_5)}$: calor específico do gás a pressão constante na temperatura do ponto 5 [kJ/kg.K]

C_{pi} : calor específico a pressão constante do componente i do gás [kJ/kg.K]

$c_{pm.gás}$: calor específico médio a pressão constante do gás [kJ/kg.K]

X_i : fração mássica do componente i do gás [-]

De acordo com Villela (2007), a perda de carga no trocador de calor é de 5%, e a mesma consideração é adotada para o sistema de limpeza. Desta forma é utilizada a equações (4.11) e (4.12) para determinar as pressões P_4 (trocador de calor) e P_5 (sistema de limpeza), respectivamente. E neste trabalho é considerado que a pressão de entrada no MCI e no compressor de gás é de 100 kPa.

$$P_4 = \frac{P_5}{1 - \Delta P_{TC}} \quad (4.11)$$

$$P_5 = \frac{P_6}{1 - \Delta P_{SL}} \quad (4.12)$$

Onde:

P_4 : pressão do gás no ponto 4 [kPa]

P_5 : pressão do gás no ponto 5 [kPa]

P_6 : pressão do gás no ponto 6 [kPa]

ΔP_{TC} : perda de carga no trocador de calor [-]

ΔP_{SL} : perda de carga no sistema de limpeza [-]

4.2.3 Seleção do motor de combustão interna

O principal combustível queimado nos motores de combustão interna (MCI) é o gás natural. Atualmente já são desenvolvidos MCI a biogás, mas quando utilizado outro tipo de biocombustível, como syngas (gás) que possui menor valor de Poder Calorífico Inferior (PCI), ocorre alterações no desempenho do motor, principalmente na produção de energia e eficiência de geração de eletricidade (WANG, et al. 2015).

Para selecionar o melhor MCI é considerada a eficiência de geração de eletricidade, calculada pela equação (4.13):

$$\eta_{el.MCI} = \frac{\dot{E}_{p.MCI}}{\dot{E}_{gás}} \quad (4.13)$$

Onde:

$\dot{E}_{gás}$: potência suprida pelo gás [kW]

$\dot{E}_{p.MCI}$: potência elétrica do MCI [kW]

$\eta_{el.MCI}$: eficiência de geração de eletricidade do MCI [kW]

A energia suprida pelo gás é dada pela equação (4.14):

$$\dot{E}_{gás} = \dot{m}_{gás} \cdot PCI_{gás} \quad (4.14)$$

Onde:

$\dot{E}_{gás}$: potência suprida pelo gás [kW]

$\dot{m}_{gás}$: fluxo mássico de gás [kg/s]

$PCI_{gás}$; poder calorífico inferior do gás de síntese [kJ/kg]

Quando é utilizado outro combustível de menor poder calorífico inferior em motores a gás natural, faz-se necessário considerar o fator de correção de PCI (γ_{PCI}) na equação de eficiência de geração de eletricidade, conforme equação (4.15) (WANG et al., 2015).

$$\gamma_{PCI} \cdot \eta_{el.MCI} = \frac{\dot{E}_{p.MCI}}{\dot{E}_{gás}} \quad (4.15)$$

Onde:

$\dot{E}_{gás}$: energia suprida pelo gás [kW]

$\dot{E}_{p.MCI}$: potência elétrica do MCI [kW]

γ_{PCI} : fator de correção do PCI [-]

$\eta_{el.MCI}$: eficiência de geração de eletricidade do MCI [kW]

O fator de correção do poder calorífico inferior é calculado conforme equação (4.16):

$$\gamma_{PCI} = 0,102 \cdot \frac{PCI_{gás}}{PCI_{GN}} + 0,897 \quad (4.16)$$

Onde:

$PCI_{gás}$: poder calorífico inferior do gás [kJ/kg]

PCI_{GN} : poder calorífico inferior do gás natural [kJ/kg]

γ_{PCI} : fator de correção do PCI [-]

Desta forma, com fator de correção PCI, com o valor de eficiência do MCI e energia suprida pelo gás é possível selecionar o MCI conforme o valor da potência elétrica, conforme equação (4.17):

$$\dot{E}_{p.MCI} = \gamma_{el} \cdot \eta_{el.MCI} \cdot \dot{E}_{gás} \quad (4.17)$$

De acordo com Maya et al. (2016) o motor de combustão interna tem eficiência de geração de eletricidade que varia de 14-26%. Desta forma, ara este trabalho é considerado a eficiência de geração de eletricidade do MCI de 20% para realizar a seleção do motor de combustão interna adequado para cada configuração através de catálogos.

4.2.4 Eficiência energética do sistema gaseificador a plasma associado ao MCI

A eficiência energética do processo de gaseificação associado ao motor de combustão interna é calculada através da equação (4.18).

$$\eta_{gp.el.MCI} = \eta_{gp} \cdot \eta_{el.MCI} \quad (4.18)$$

Onde:

$\eta_{el.MCI}$: eficiência de geração de eletricidade do motor de combustão interna [-]

η_{gp} : eficiência do gaseificador a plasma [-]

$\eta_{gp.el.MCI}$: eficiência energética do processo de gaseificação a plasma associado ao MCI [-]

4.2.5 Porcentagem de eletricidade que o MCI pode suprir no gaseificador a plasma

A porcentagem de eletricidade produzida no MCI com a queima do gás (syngas) que pode suprir o gaseificador a plasma é determinado através da equação (4.19).

$$\Omega_{el.MCI} = \frac{\dot{E}_{p.MCI}}{\dot{E}_{tocha}} \cdot 100 \quad (4.19)$$

Onde:

$\dot{E}_{p.MCI}$: potência elétrica do MCI [kW]

\dot{E}_{tocha} : potência elétrica requerida na tocha [kW]

$\Omega_{el.MCI}$: Porcentagem de eletricidade que o MCI pode suprir no gaseificador a plasma [%]

4.2.6 Seleção do conjunto turbina a gás

Para selecionar o conjunto turbina a gás mais apropriado para a quantidade de gás produzido, deve considerar a eficiência de geração de eletricidade, conforme equação (4.20):

$$\dot{E}_{p.TG} = \eta_{el.TG} \cdot \dot{E}_{gás} \quad (4.20)$$

Onde:

$\dot{E}_{gás}$: energia suprida pelo gás de síntese [kW]

$\dot{E}_{p.TG}$: potência elétrica da turbina a gás [kW]

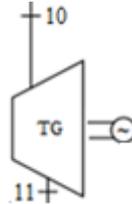
$\eta_{el.TG}$: eficiência de geração de eletricidade da turbina a gás [-]

Segundo Maya et al. (2016), a eficiência de geração de eletricidade da turbina a gás varia de 20 – 30%. Para selecionar o conjunto turbina a gás foi considerada a eficiência de geração de eletricidade de 25%. A seleção é realizada através do *Handbook Gas Turbine World 2012*, conforme resultado da equação (4.20).

4.2.7 Turbina a gás

A figura 9 mostra a turbina a gás da configuração 2.

Figura 9 – Turbina a gás



Fonte: Elaborado pelo autor

No *Handbook Gas Turbine World 2012* é possível obter alguns parâmetros da turbina selecionada, como: fluxo mássico e temperatura dos gases de exaustão na saída da turbina, razão de pressão, entre outros.

Para determinar a temperatura entrada dos gases de exaustão na turbina a gás (T_{10}) é utilizada a equação (4.21) (VILLELA, 2007):

$$T_{10} = \frac{T_{11}}{\left\{ 1 - \eta_{isoTG} \left[1 - (RP)^{\frac{1-\lambda_G}{\lambda_G}} \right] \right\}} \quad (4.21)$$

Onde:

$$\lambda_G = \frac{1}{1 - \frac{R_G}{c_{pG}}} \quad (4.22)$$

Onde:

c_{pG} : calor específico a pressão constante do gás de exaustão [kJ/kg.K]

R_G : constante dos gases para o gás de exaustão [kJ/kg.K]

RP : razão de pressão [-]

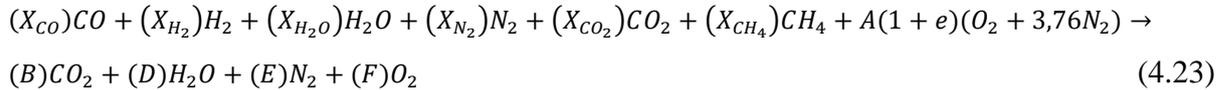
T_{10} : temperatura no ponto 10 da TG [K]

T_{11} : temperatura no ponto 11 da TG [K]

λ_G : relação entre calor específico a pressão constante e calor específico a volume constante [-]

η_{isoTG} : eficiência isoentrópica da turbina a gás [0,89 (VILLELA, 2007)]

Através da combustão do gás (syngas) é determinada a composição dos gases de exaustão, conforme equação (4.23). De acordo com Coronado et al. (2009), o excesso de ar para o MCI é de 40% e do CTG de 220 %. A fração mássica de cada elemento do gás está em função do melhor ponto de operação e é apresentado na seção 6.2.1.



O calor específico a pressão constante dos componentes do gases de exaustão (c_{pG}) pode ser determinado pelas equações (4.7), (4.8) e (4.9), considerando as frações mássicas da equação (4.24).

A equação (4.24) determina a constante dos gases para os gases de exaustão.

$$R_G = \frac{\sum_i X_i R_i}{X_i} \quad (4.24)$$

A tabela 8 apresenta a constante dos gases para cada componente.

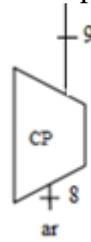
Tabela 8 – Tabela da constante dos gases	
Elemento	R [kJ/kg.K]
H ₂	4,1243
CO	0,2968
CO ₂	0,1889
H ₂ O	0,4615
CH ₄	0,5183
N ₂	0,2968
O ₂	0,2598

Fonte: Borgnakke e Sonntag (2013)

4.2.8 Análise energética do compressor de ar

A figura 10 mostra o compressor de ar da configuração 2.

Figura 10 – Compressor de ar



Fonte: Elaborado pelo autor

No sistema gaseificação a plasma associado ao conjunto turbina a gás há um compressor para alimentar a câmara de combustão. A equação (4.25) determina a temperatura de saída do compressor (VILLELA, 2007).

$$T_9 = T_8 \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_{isoc}} \left[\left(\frac{P_9}{P_8} \right)^{\frac{\lambda_{ar}-1}{\lambda_{ar}}} - 1 \right] \right\} \quad (4.25)$$

Onde:

T_8 : temperatura do ar no ponto 8 do compressor [K]

T_9 : temperatura do ar no ponto 9 do compressor [K]

P_7 : Pressão do ar ponto 7 do compressor [kPa]

P_8 : Pressão do ar ponto 8 do compressor [kPa]

η_{isoc} : eficiência isoentrópica do compressor [80%] (VILLELA, 2007)

λ_{ar} : relação entre calor específico a pressão constante e calor específico a volume constante do ar [kJ/kg.K].

- O ar tem constante (R_{ar}) de 0,287 kJ/kg.K (SILVEIRA,2003);

- O calor específico a pressão constante do ar (c_{par}) é 1,004 kJ/kg.K (BORGNAKKE E SONNTAG (2013);

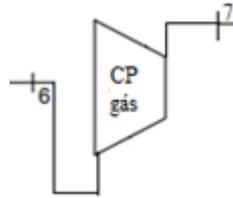
4.2.9 Análise energética da câmara de combustão

Neste trabalho é considerado que a pressão de entrada do gás na câmara de combustão é a igual a pressão de entrada do ar e de saída do gás de exaustão. Desta forma, é necessário que acrescente um compressor de gás para elevar a pressão do gás que sai do sistema de limpeza com destino a câmara de combustão.

4.2.10 Análise energética do compressor de gás

A figura 11 mostra do compressor de gás da configuração 2.

Figura 11 – Compressor de gás



Fonte: Elaborado pelo autor

No sistema gaseificação a plasma associado ao conjunto turbina a gás há um compressor para alimentar a câmara de combustão. A equação (4.26) determina a temperatura do gás na saída do compressor (adaptado de VILLELA, 2007).

$$T_7 = T_6 \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_{isoc}} \left[\left(\frac{P_7}{P_6} \right)^{\frac{\lambda_{gás}-1}{\lambda_{gás}}} - 1 \right] \right\} \quad (4.26)$$

A relação entre calor específico a pressão constante e calor específico a volume constante pode ser escrita em função da constante do gás, conforme equação (4.27).

$$\lambda_{gás} = \frac{1}{1 - \frac{R_{gás}}{c_{pgás}}} \quad (4.27)$$

Onde:

T_6 : temperatura do gás (syngas) no ponto 6 do compressor a gás[K]

T_7 : temperatura do gás (syngas) no ponto 7 do compressor a gás[K]

P_6 : pressão do gás no ponto 6 do compressor de gás [kPa]

P_7 : pressão do gás no ponto 6 do compressor de gás [kPa]

η_{isoc} : eficiência isoentrópica do compressor [80%] (VILLELA, 2007)

$\lambda_{gás}$: relação entre calor específico a pressão constante e calor específico a volume constante do ar [kJ/kg.K].

A constante do gás é determinada através da equação (4.24) e o calor específico do gás (syngas) é determinado através das equações (4.7), (4.8) e (4.9), considerando a fração mássica de cada elemento que compõe o gás.

4.2.11 Eficiência energética do sistema gaseificador a plasma associado ao conjunto turbina a gás

Através da equação (4.28) é possível calcular a eficiência energética do processo e a gaseificação a plasma associado a turbina a gás.

$$\eta_{gp.el.TG} = \eta_{gp} \cdot \eta_{el.TG} \quad (4.28)$$

Onde:

$\eta_{gp.el.TG}$: eficiência energética do processo de gaseificação a plasma associado a TG [-]

η_{gp} : eficiência do gaseificador a plasma [-]

$\eta_{el.TG}$: eficiência de geração de eletricidade da turbina a gás [-]

4.2.12 Porcentagem de eletricidade que a turbina a gás pode suprir no gaseificador a plasma

A porcentagem de eletricidade que a turbina a gás pode suprir no gaseificador a plasma é a relação entre a eletricidade produzida na TG e a potência eletricidade requerida na tocha do gaseificador a plasma, conforme equação (4.29):

$$\Omega_{el.TG} = \frac{\dot{E}_{p.TG}}{\dot{E}_{tocha}} \cdot 100 \quad (4.29)$$

Onde:

$\dot{E}_{p.TG}$: potência elétrica do TG [kW]

\dot{E}_{tocha} : potência elétrica requerida na da tocha [kW]

$\Omega_{el.TG}$: porcentagem de eletricidade que a turbina a gás pode suprir no gaseificador a plasma [%]

4.3 ANÁLISE EXERGÉTICA

A realização da análise exergética de um sistema identifica o equipamento onde há o maior desperdício e perdas. A exergia é o máximo trabalho teórico possível de ser obtido a partir de um sistema global, composto por um sistema e o ambiente, conforme este entra em equilíbrio com o ambiente atinge o estado morto (BORGNAKKE E SONNTAG (2013).

De acordo com Kotas (1985) e Szargut (1988) exergia (Ex) pode ser dividida em cinética ($Ex_{cinética}$), potencial ($Ex_{potencial}$), física ($Ex_{física}$) e química ($Ex_{química}$).

$$Ex = Ex_{cinética} + Ex_{potencial} + Ex_{física} + Ex_{química} \quad (4.30)$$

Para os estudos deste trabalho a exergia cinética e potencial são consideradas desprezíveis. A exergia física é decomposta em relação a temperatura e outra a pressão, normalmente usada para gases, sendo determinada através da equação (4.31) (VILLELA, 2007).

$$Ex_{física} = \dot{m}_{gás} \cdot \left\{ c_{p,gás} [(T_{gás} - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_{gás}}{T_0} \right)] + R_{gás} T_0 \ln \left(\frac{P_{gás}}{P_0} \right) \right\} \quad (4.31)$$

Onde:

$c_{p,gás}$: calor específico a pressão constante do gás [kJ/kg.K]

$Ex_{física}$: exergia física [kW]

$\dot{m}_{gás}$: fluxo mássico de gás [kg/s]

P_0 : pressão do ponto morto [100 kPa]

$P_{gás}$: pressão do gás [kPa]

$R_{gás}$: constante dos gases para o gás [kJ/kg.K]

T_0 : temperatura do ponto morto [298 K]

$T_{gás}$: temperatura do gás [K]

E quando é possível obter as propriedades de entalpia e entropia do fluido, a exergia física é determinada através da equação (4.32) (VILLELA, 2007).

$$Ex_{física} = \dot{m} \cdot [(h - h_0) - T_0 (s - s_0)] \quad (4.32)$$

Onde:

$Ex_{física}$: exergia física [kW]

h : entalpia específica [kJ/kg]

h_0 : entalpia específica do ponto morto [104,9 kJ/kg]

\dot{m} : fluxo mássico [kg/s]

s : entropia específica [kJ/kg.K]

s_0 : entropia específica do ponto morto [0,3674 kJ/kg.K]

T_0 : temperatura do ponto morto [298 K]

A exergia química é a capacidade de um fluxo de produzir trabalho devido ao seu desequilíbrio químico com o meio ambiente ou estado de referência (CORONADO, 2010). A exergia química de um combustível gasoso ou produtos de combustão é calculado através da equação (4.33) (ZHANG et. al, 2013b):

$$Ex_{química} = \dot{m}_{gás} \cdot [\sum_i X_i \cdot ex_i + R \cdot T_0 \cdot \sum_i X_i \cdot \ln(X_i)] \quad (4.33)$$

Onde:

ex_i : exergia específica química do componente i [kJ/kg]

$Ex_{química}$: exergia química [kW]

$\dot{m}_{gás}$: fluxo mássico de gás [kg/s]

R : constante dos gases [kJ/kg.K]

T_0 : temperatura do ponto morto [298 K]

X_i : fração mássica do componente i [-]

A tabela 9 apresenta a exergia química, de todos elementos que compõem gás e gases de exaustão.

Tabela 9 – Exergia química

Substância	$ex_i \left[\frac{kJ}{kmol} \right]$
H_2O	9500
CO	275100
H_2	236100
CO_2	19870
CH_4	831650
C_2H_4	1361100
N_2	720
O_2	3970

Fonte: Zhang et. al (2012)

Dincer et al. (2004) afirma que a eficiência exérgica considera o aumento da energia indisponível, devido a elevação da entropia no processo ou sistema. Desta forma, a eficiência exérgica considera as perdas associadas às irreversibilidades, somadas ao desperdício nas emissões.

A eficiência exérgica, conhecida como eficiência de segunda lei, é a relação entre a exergia de saída (produto) e a exergia de entrada (combustível), e é determinada através da equação (4.34) (TSATSARONIS, 2007).

$$\varepsilon = \frac{Ex_{produto}}{Ex_{combustível}} \quad (4.34)$$

Onde:

ε : eficiência de Segunda Lei [-]

$Ex_{combustível}$: exergia do combustível [kW]

$Ex_{produto}$: exergia do produto [kW]

A eficiência exérgica, conhecida como eficiência racional de Bosnakovic, é a razão entre a somatória da exergia de saída pela somatória da exergia de entrada num sistema, conforme equação (4.35) (UTLU, 2006).

$$\psi = \frac{\sum Ex_s}{\sum Ex_e} \quad (4.35)$$

Onde:

$\sum Ex_e$: somatória da exergia de entrada [kW]

$\sum Ex_s$: somatória da exergia de saída [kW]

ψ : eficiência de racional de Bosnakovic [-]

Coronado (2010) afirma em seu trabalho que os processos encontrados na natureza têm algum grau de irreversibilidade. Somente no plano ideal são possíveis aqueles processos que não geram atrito e nem transferência de calor. Todos os processos irreversíveis podem ser identificados por três características básicas: durante a operação há sempre dissipações de energia; acontecem espontaneamente e numa única direção; para acontecerem no sentido inverso é necessária a introdução de energia.

Irreversibilidade é definida como a diferença entre o trabalho teoricamente possível e o que de fato é produzido, conforme equação (4.36) (VILLELA, 2007).

$$I = \sum Ex_e - \sum Ex_s \quad (4.36)$$

Onde:

I : irreversibilidade [kW]

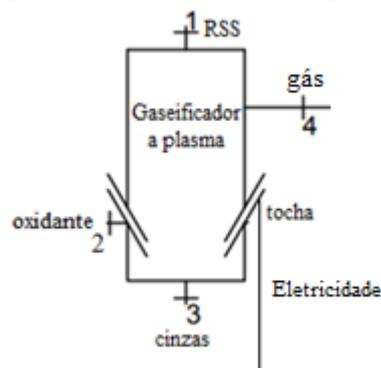
$\sum Ex_e$: somatória da exergia de entrada [kW]

$\sum Ex_s$: somatória da exergia de saída [kW]

4.3.1 Análise exérgica do gaseificador

A figura mostra o gaseificador a plasma da configuração 1 e 2.

Figura 12 – Gaseificador a plasma



Fonte: Elaborado pelo autor

Para análise exergetica do gaseificador a plasma considera-se a exergia do RSS e do gás, e também a eletricidade requerida no gaseificador. A eficiência de Segunda Lei e de Bosnakovic e é determinada através da equação (4.37) e (4.38), respectivamente.

$$\varepsilon_{gp} = \frac{Ex_4}{Ex_1 + \dot{E}_{tocha}} \quad (4.37)$$

$$\psi_{gp} = \frac{Ex_4}{Ex_1 + \dot{E}_{tocha}} \quad (4.38)$$

A irreversibilidade do gaseificador a plasma é calculada através da equação (4.39).

$$I_{gp} = Ex_1 + \dot{E}_{tocha} - Ex_4 \quad (4.39)$$

Onde:

ε_{gp} : eficiência de Segunda Lei do gaseificador a plasma [-]

$Ex_1 = Ex_{RSS}$: exergia do RSS (ponto 1) [kW]

Ex_4 : exergia do gás (ponto 4) [kW]

\dot{E}_{tocha} : potência elétrica da tocha [kW]

I_{gp} : irreversibilidade do gaseificador a plasma [kW]

ψ_{gp} : eficiência de Bosnakovic do gaseificador a plasma[-]

A exergia química do RSS é determinada pela equação (4.40) (ZHANG et al., 2013).

$$Ex_{RSS} = \dot{m}_{RSS} \cdot \left[PCI_{RSS} \frac{1,044 + 0,016 \frac{X_H}{X_C} - 0,3493 \frac{X_O}{X_C} \left(1 + 0,0531 \frac{X_H}{X_C} \right) + 0,0493 \frac{X_N}{X_C}}{1 - 0,4124 \frac{X_O}{X_C}} \right] \quad (4.40)$$

Onde:

Ex_{RSS} : exergia do RSS [kW]

\dot{m}_{RSS} : fluxo mássico do RSS [kg/s]

PCI_{RSS} : poder calorífico inferior do resíduo [kJ/kg]

X_C : fração mássica de carbono [-]

X_H : fração mássica de hidrogênio [-]

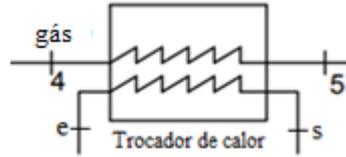
X_N : fração mássica de hidrogênio [-]

X_O : fração mássica de oxigênio [-]

4.3.2 Análise exergetica do trocador de calor

A figura 13 mostra o trocador de calor da configuração 1 e 2.

Figura 13 – Trocador de calor



Fonte: Elaborado pelo autor

Na análise exergetica do trocador de calor é considerada a exergetica do gás (syngas) e da água com base na temperatura de entrada e saída do TC. A eficiência exergetica de Segunda Lei e de Bosnakovic do trocador de calor é calculada através da equação (4.41) e (4.42), respectivamente.

$$\varepsilon_{TC} = \frac{Ex_s - Ex_e}{Ex_4 - Ex_5} \quad (4.41)$$

$$\psi_{TC} = \frac{Ex_s + Ex_5}{Ex_e + Ex_4} \quad (4.42)$$

A irreversibilidade do TC é determinada através da equação (4.43).

$$I_{TC} = Ex_e + Ex_4 - Ex_s - Ex_5 \quad (4.43)$$

Onde:

\dot{E}_{pMCI} : potência elétrica produzida no motor de combustão interna [kW]

Ex_e : exergetica de entrada da água no TC [kW]

Ex_s : exergetica de saída da água no TC [kW]

Ex_7 : exergetica do gás (ponto 7) [kW]

Ex_9 : exergetica dos gases de exaustão do motor de combustão interna (ponto 9) [kW]

I_{TC} : irreversibilidade do motor de combustão interna [kW]

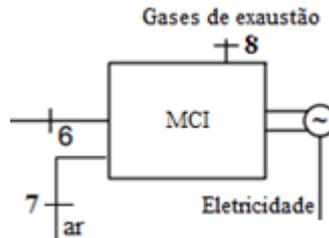
ε_{TC} : eficiência de Segunda Lei do MCI [-]

ψ_{TC} : eficiência de racional de Bosnakovic do motor de combustão interna [-]

4.3.3 Análise exergetica do motor de combustão interna

A figura 14 mostra o motor de combustão interna da configuração 1.

Figura 14 – Motor de combustão interna



Fonte: Elaborado pelo autor

Na análise exergetica do MCI é considerado a exergia do syngas, dos gases de exaustão e a eletricidade produzida. A eficiência exergetica de Segunda Lei e de Bosnakovic do motor de combustão interna é calculada através da equação (4.44) e (4.45), respectivamente.

$$\varepsilon_{MCI} = \frac{\dot{E}_{pMCI}}{Ex_6 - Ex_8} \quad (4.44)$$

$$\psi_{MCI} = \frac{Ex_8 + \dot{E}_{pMCI}}{Ex_6} \quad (4.45)$$

A irreversibilidade do MCI é determinada através da equação (4.46).

$$I_{MCI} = Ex_6 - Ex_8 - \dot{E}_{pMCI} \quad (4.46)$$

Onde:

\dot{E}_{pMCI} : potência elétrica produzida no MCI [kW]

Ex_6 : exergia do gás (ponto 6) [kW]

Ex_8 : exergia dos gases de exaustão do motor de combustão interna (ponto 8) [kW]

I_{MCI} : irreversibilidade do motor de combustão interna [kW]

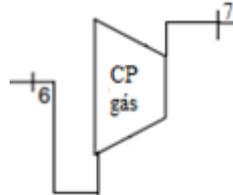
ε_{MCI} : eficiência de Segunda Lei do MCI [-]

ψ_{MCI} : eficiência de racional de Bosnakovic do MCI[-]

4.3.4 Análise exergetica do compressor de gás

A figura 15 mostra o compressor de gás da configuração 2.

Figura 15 – Compressor de gás da configuração 2



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise exergetica do compressor de gás da configuração 2, envolve a exergia do gás na entrada e na saída do equipamento de acordo com as respectivas temperaturas, e a potência elétrica exigida para seu funcionamento. Desta forma, a eficiência de Segunda Lei e de Bosnakovic são determinadas através das equações (4.47) e (4.48), respectivamente.

$$\varepsilon_{CP.gás} = \frac{Ex_7 - Ex_6}{E_{pCP.gás}} \quad (4.47)$$

$$\psi_{CP.gás} = \frac{Ex_7}{Ex_6 + \dot{E}_{pCP.gás}} \quad (4.48)$$

A potência elétrica requerida no compressor de gás é determinada através da equação (4.49)

$$\dot{E}_{pCP.gás} = \dot{m}_{gás} \cdot c_{pm.gás} \cdot (T_7 - T_6) \quad (4.49)$$

As irreversibilidades do compressor de gás é determinada pela equação (4.50).

$$I_{CP.gás} = Ex_6 + \dot{E}_{pCP.gás} - Ex_7 \quad (4.50)$$

Onde:

$c_{pm.gás}$: calor específico médio a pressão constante do gás [kJ/kg.K]

$\dot{E}_{pCP.gás}$: potência elétrica do compressor de gás [kW]

Ex_6 : exergia do gás (ponto 6) [kW]

Ex_7 : exergia do gás (ponto 7) [kW]

$I_{CP.gás}$: irreversibilidade do compressor de gás [kW]

$\dot{m}_{gás}$: fluxo mássico de gás [kg/s]

T_6 : temperatura do gás no ponto 6 do compressor a gás [K]

T_7 : temperatura do gás no ponto 7 do compressor a gás [K]

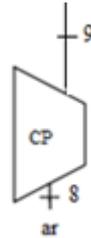
$\varepsilon_{CP.gás}$: eficiência de Segunda Lei do compressor de gás [-]

$\psi_{CP.gás}$: eficiência de Bosnakovic do compressor de gás [-]

4.3.5 Análise exérgica do compressor de ar

A figura 16 mostra o compressor de ar da configuração 2.

Figura 16 – Compressor de ar da configuração 2



Fonte: Elaborado pelo autor

A configuração 2 apresenta um conjunto turbina a gás, utilizado para geração de eletricidade. Este conjunto é formado por compressor de ar, câmara de combustão e turbina a gás. Nesta seção é realizada a análise exérgica no compressor de ar. A eficiência de Segunda Lei e de Bosnakovic são determinadas através das equações (4.51) e (4.52), respectivamente.

$$\varepsilon_{CP.ar} = \frac{Ex_9 - Ex_8}{E_{pCP.ar}} \quad (4.51)$$

$$\psi_{CP.ar} = \frac{Ex_9}{Ex_8 + \dot{E}_{pCP.gás}} \quad (4.52)$$

A potência elétrica requerida no compressor de ar é determinada através da equação (4.53).

$$\dot{E}_{pCP.ar} = \dot{m}_{ar} \cdot c_{pm.ar} \cdot (T_9 - T_8) \quad (4.53)$$

As irreversibilidades do compressor de ar é determinada pela equação (4.54).

$$I_{CP,ar} = Ex_8 + \dot{E}_{pCP,ar} - Ex_9 \quad (4.54)$$

Onde:

$c_{pm,ar}$: calor específico médio a pressão constante do ar [kJ/kg.K]

$\dot{E}_{pCP,ar}$: potência elétrica do compressor de ar [kW]

Ex_8 : exergia do ar no compressor (ponto 8) [kW]

Ex_9 : exergia do ar no compressor (ponto 9) [kW]

$I_{CP,ar}$: irreversibilidade do compressor de ar [kW]

\dot{m}_{ar} : fluxo mássico de ar [kg/s]

T_8 : temperatura do gás no ponto 8 do compressor a ar [K]

T_9 : temperatura do gás no ponto 9 do compressor a ar [K]

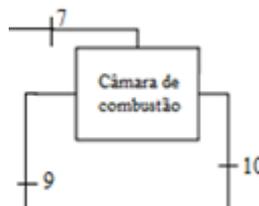
$\varepsilon_{CP,ar}$: eficiência de Segunda Lei do compressor de ar [-]

$\psi_{CP,ar}$: eficiência de Bosnakovic do compressor de ar [-]

4.3.6 Análise exérgica da câmara de combustão

A figura 17 apresenta a câmara de combustão da configuração 2.

Figura 17 – Câmara de combustão da configuração 2



Fonte: Elaborado pelo autor

Na análise exérgica da câmara de combustão são consideradas as exergias do gás de exaustão, do gás e do ar. Desta forma, a eficiência exérgica de Segunda Lei e de Bosnakovic da câmara de combustão é determinada através da equação (4.55) e (4.56), respectivamente.

$$\varepsilon_{CC} = \frac{Ex_{10} - Ex_9}{Ex_7} \quad (4.55)$$

$$\psi_{CC} = \frac{Ex_{10}}{Ex_7 + Ex_9} \quad (4.56)$$

A irreversibilidade da câmara de combustão é calculada através da equação (4.57).

$$I_{CC} = Ex_7 + Ex_9 - Ex_{10} \quad (4.57)$$

Onde:

Ex_7 : exergia do gás (ponto 7) [kW]

Ex_9 : exergia do ar (ponto 9) [kW]

Ex_{10} : exergia do gás de exaustão do conjunto turbina a gás (ponto 10) [kW]

I_{CC} : irreversibilidade da câmara de combustão [kW]

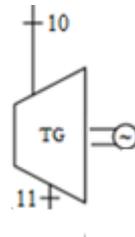
ε_{CC} : eficiência de Segunda Lei da câmara de combustão [-]

ψ_{CC} : eficiência de racional de Bosnakovic da câmara de combustão [-]

4.3.7 Análise exergética da turbina a gás

A figura 18 mostra a turbina a gás da configuração 2.

Figura 18 – Turbina a gás da configuração 2



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise exergética da turbina a gás consiste em estudos das exergias dos gases de exaustão de entrada e saída, e a potência elétrica produzida. Desta forma, a eficiência de Segunda Lei e de Bosnakovic da turbina a gás é determinada através das equações (4.58) e (4.59).

$$\varepsilon_{TG} = \frac{\dot{E}_{pTG}}{Ex_{10} - Ex_{11}} \quad (4.58)$$

$$\psi_{TG} = \frac{Ex_{11} + \dot{E}_{pTG}}{Ex_{10}} \quad (4.59)$$

A irreversibilidade da turbina a gás é determinada pela equação (4.60).

$$I_{TG} = Ex_{10} - Ex_{11} - \dot{E}_{pTG} \quad (4.60)$$

Onde:

\dot{E}_{pTG} : potência elétrica da turbina a gás [kW]

Ex_{10} : exergia dos gases de exaustão do conjunto turbina a gás (ponto 10) [kW]

Ex_{11} : exergia dos gases de exaustão do conjunto turbina a gás (ponto 11) [kW]

I_{TG} : irreversibilidade da turbina a gás [kW]

ε_{TG} : eficiência de Segunda Lei da turbina a gás [-]

ψ_{TG} : eficiência de Bosnakovic da câmara da turbina a gás [-]

5 ANÁLISE ECONÔMICA

Para fazer o estudo de viabilidade econômica é necessário calcular o custo de produção do gás e de eletricidade, e em determinar a receita anual de forma a obter o payback e desta forma mostrar o tempo de retorno dos investimentos e fazer a avaliação se a gaseificação a plasma de RSS é viável.

5.1 FATOR DE ANUIDADE

Para avaliar a viabilidade em termos de rentabilidade do processo de gaseificação é necessário fazer estudos de engenharia econômica. Visando obter financiamentos para investir nessa nova tecnologia deve ser considerado o fator de anuidade, que está de acordo com da taxa de juros anual e do período de amortização (*payback*).

O fator de anuidade é determinado através da equação (5.1) (SILVEIRA, 2017).

$$f = \frac{q^k(q-1)}{q^k-1} \quad (5.1)$$

Onde:

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (5.2)$$

Onde:

f : fator de anuidade [1/ano]

k : período de amortização de capital (*payback*) [anos]

r : taxa de anual de juros [%]

5.2 CUSTO DE PRODUÇÃO DE GÁS (SYNGAS)

A determinação do custo de produção do gás (syngas), considerando gaseificação a plasma associado ao motor de combustão interna (configuração 1), ao conjunto turbina a gás (configuração 2) é realizado através da metodologia adaptada de Paulino (2019 e 2020), conforme equação (5.3).

$$C_{gás} = \frac{Inv_{gp.plant} \cdot f}{H \cdot \dot{E}_{gás}} + Cop_{gp.plant} + Cman_{gp.plant} \quad (5.3)$$

Onde:

$C_{gás}$: custo de produção do gás [US\$/kWh]

$C_{man_{gp.plant}}$: custo de manutenção da planta de gaseificação a plasma [US\$/kWh]

$C_{op_{gp.plant}}$: custo de operação da planta de gaseificação para configuração [US\$/kWh]

$\dot{E}_{gás}$: energia suprida pelo gás [kW]

f : fator de anuidade [1/ano]

H : período equivalente de utilização [h/ano]

$Inv_{gp.plant}$: investimento da planta de gaseificação a plasma [US\$]

Byun et al. (2012) apresenta em seu trabalho que o custo de operação da planta de gaseificação a plasma deve considerar a mão de obra, a depreciação e o seguro, que corresponde a 25% do investimento. Além destes custos, deve-se considerar a eletricidade requerida na tocha que é necessária ser comprada da rede de distribuição de energia, e para a configuração 2 acrescenta a potência elétrica utilizada no compressor de gás. Desta forma, a equação (5.4) determinar o custo de operação total da planta de gaseificação a plasma.

$$C_{op_{gp.plant}} = 0,25 \cdot \frac{Inv_{gp.plant} \cdot f}{H \cdot \dot{E}_{gás}} + \frac{E_{tocha} \cdot P_{el}}{\dot{E}_{gás}} + \frac{E_{pCP.gás} \cdot P_{el}}{\dot{E}_{gás}} \quad (5.4)$$

Onde:

$C_{op_{gp.plant}}$: custo de operação da planta de gaseificação para configuração [US\$/kWh]

$\dot{E}_{gás}$: energia suprida pelo gás [kW]

$\dot{E}_{pCP.gás}$: potência elétrica do compressor de gás [kW]

\dot{E}_{tocha} : potência elétrica da tocha [kW]

P_{el} : tarifa de eletricidade [US\$/kWh]

De acordo com Paulino et al. (2019 e 2020), o custo de manutenção do sistema gaseificação a plasma é 3% da parcela do investimento da planta, conforme equação (5.5).

$$C_{man_{gp.plant}} = 0,03 \cdot \frac{Inv_{gp.plant} \cdot f}{H \cdot \dot{E}_{gás}} \quad (5.5)$$

Onde:

$C_{man_{gp.plant}}$: custo de manutenção da planta de gaseificação a plasma [US\$/kWh]

$C_{gás}$: custo de produção do gás [US\$/kWh]

$\dot{E}_{gás}$: energia suprida pelo gás [kW]

f : fator de anuidade [1/ano]

H : período equivalente de utilização [h]

$Inv_{gp.plant}$: investimento da planta de gaseificação a plasma [US\$]

5.3 CUSTO DE PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE NO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

O custo de produção de eletricidade é determinado pela equação (5.6), conforme adaptação de Paulino (2019 e 2020).

$$C_{el.MCI} = \frac{Inv_{MCI} \cdot f}{H \cdot \dot{E}_{p.MCI}} + Cop_{MCI} + Cman_{MCI} \quad (5.6)$$

Onde:

$C_{el.MCI}$: custo de produção de eletricidade no motor de combustão interna [US\$/kWh]

Cop_{MCI} : custo de operação do motor de combustão interna [US\$/kWh]

$Cman_{MCI}$: custo de manutenção do motor de combustão interna [US\$/kWh]

$\dot{E}_{p.MCI}$: eletricidade produzida no motor de combustão interna [kW]

f : fator de anuidade [1/ano]

H : período equivalente de utilização [h]

Inv_{MCI} : investimento no motor de combustão interna [US\$]

O custo de operação do MCI considera o custo de produção do gás (syngas) e a eletricidade que este produz e é determinado através da equação (5.7).

$$Cop_{MCI} = \frac{\dot{E}_{gás} \cdot C_{gás}}{\dot{E}_{p.MCI}} \quad (5.7)$$

Onde:

$C_{gás}$: custo de produção de gás para configuração 1 [US\$/kWh]

Cop_{MCI} : custo de operação do motor de combustão interna [US\$/kWh]

$\dot{E}_{p.MCI}$: eletricidade produzida no motor de combustão interna [kW]

$\dot{E}_{gás}$: energia suprida pelo gás [kW]

De acordo com Brizi (2014), o custo de manutenção do MCI é 0,0130 US\$/kWh.

5.4 CUSTO DE PRODUÇÃO DA ELETRICIDADE NO CONJUNTO TURBINA A GÁS

O custo de produção da eletricidade produzida no conjunto turbina a gás partir do syngas é determinado através da equação (5.8) (PAULINO, 2019).

$$C_{el.TG} = \frac{Inv_{TG} \cdot f}{H \cdot \dot{E}_{p.TG}} + Cop_{TG} + Cman_{TG} \quad (5.8)$$

Onde:

$C_{el.TG}$: custo de produção de eletricidade na turbina a gás [US\$/kWh]

$Cman_{TG}$: custo de manutenção da turbina a gás [US\$/kWh]

Cop_{TG} : custo de operação da turbina a gás [US\$/kWh]

$\dot{E}_{p.TG}$: eletricidade produzida na turbina a gás [kW]

f : fator de anuidade [1/ano]

H : período equivalente de utilização [h]

Inv_{TG} : investimento no conjunto turbina a gás [US\$]

Para determinar o custo de operação do conjunto turbina a gás é considerado o custo de produção do gás no processo de gaseificação a plasma e a eletricidade produzida na turbina, conforme equação (5.9).

$$COP_{TG} = \frac{\dot{E}_{gás.TG} \cdot C_{gás}}{\dot{E}_{p.TG}} \quad (5.9)$$

Onde:

$C_{gás}$: custo de produção de gás para configuração 2 [US\$/kWh]

Cop_{TG} : custo de operação da turbina a gás [US\$/kWh]

$\dot{E}_{p.TG}$: eletricidade produzida na turbina a gás [kW]

$\dot{E}_{gás}$: energia suprida pelo gás [kW]

De acordo com Villela (2007), o custo de manutenção da turbina a gás é 0,014 US\$/kWh.

5.5 INVESTIMENTOS

Para a montagem de uma planta de gaseificação a plasma com produção de gás e geração de eletricidade é necessário investir em equipamentos. As equações desta seção apresenta o investimento em cada equipamento utilizado nas plantas em estudo.

O investimento do sistema de gaseificação a plasma considera o gaseificador a plasma, trocador de calor para resfriar o gás e produzir água quente, e o sistema de limpeza para configuração 1, e para configuração 2 acrescenta o investimento no compressor de gás, conforme equação (5.10) e (5.11), respectivamente.

- Configuração 1:

$$Inv_{gp.plant} = Inv_{gp} + Inv_{TC} + Inv_{SL} \quad (5.10)$$

- Configuração 2:

$$Inv_{gp.plant} = Inv_{gp} + Inv_{TC} + Inv_{SL} + Inv_{C.gás} \quad (5.11)$$

Onde:

$Inv_{C.gás}$: investimento no compressor de gás [US\$]

Inv_{gp} : investimento no gaseificador a plasma [US\$]

$Inv_{gp.plant}$: investimento da planta de gaseificação a plasma [US\$]

Inv_{SL} : investimento do sistema de limpeza do gás [US\$]

Inv_{TC} : investimento no trocador de calor [US\$]

5.5.1 Investimento no gaseificador a plasma

Segundo Byun et al. (2012), o investimento no sistema de gaseificação a plasma para processar 10 TPD (417 kg/h) é de US\$2.440.000,00 e para 250 TPD (10416 kg/h) é US\$51.000.000,00. A partir destes valores foi aplicada a técnica de Técnica de Boehm (1987) conforme equação (5.12) e figura 8, para determinar a equação de investimento do sistema de gaseificação a plasma.

$$C = C_r * \left(\frac{S}{S_r}\right)^m \quad (5.12)$$

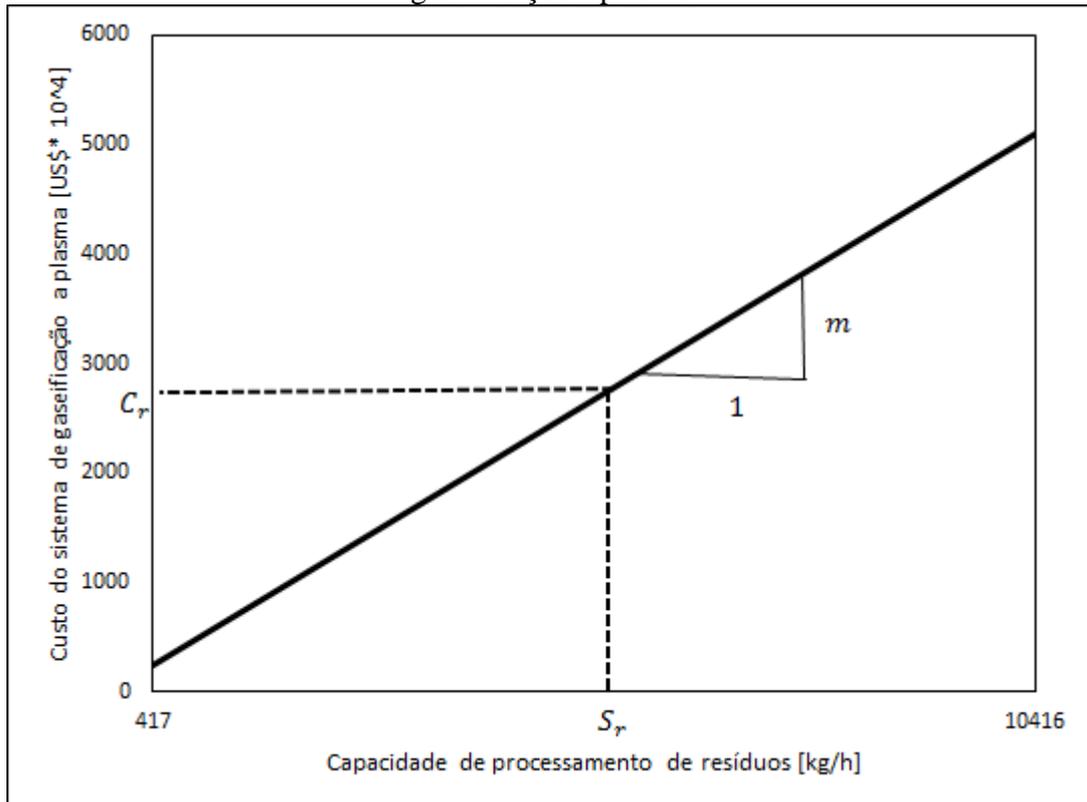
Onde:

C : custo do equipamento para uma grandeza de interesse S [US\$]

C_r : custo do equipamento para uma grandeza de referência S_r [US\$]

m : fator de incidência que indica a escala de economia [0,5 – 1,0]

Figura 19: Metodologia para determinação do custo de investimento do sistema de gaseificação a plasma



Fonte: Elaborado pelo autor

Após aplicação da metodologia de Boehm, acrescentou-se o fator 1,4 correspondente aos tributos de importação (RECEITA FEDERAL, 2021) e frete, e o fator de 1,2 que representa a inflação do dólar de 2012-2021 (SIMULADOR INFLAÇÃO DÓLAR, 2021) e determinou-se a equação (5.13) para o investimento no sistema de gaseificação a plasma para a faixa de capacidade de 10 TPD (417 kg/h) a 250 TPD (10416 kg/h).

$$Inv_{gp} = 2800 \cdot \left(\frac{m_{RSS} \cdot h}{5417} \right)^{0,85} \cdot 10^4 \cdot (1,4) \cdot (1,2) \quad (5.13)$$

Onde:

Inv_{gp} : investimento no gaseificador a plasma [US\$]

$\dot{m}_{RSS,h}$: fluxo mássico de RSS por hora [kg/h]

5.5.2 Investimento no trocador de calor

O investimento de um trocador de calor é 60 US\$/kW (BRIZI, 2014). A esta referência acrescentou o fator de 1,16 que representa a inflação do dólar de 2014-2021 (SIMULADOR INFLAÇÃO DÓLAR, 2021), obtendo-se a equação (5.14).

$$Inv_{TC} = 60 \cdot Q_{gás} \cdot (1,16) \quad (5.14)$$

Onde:

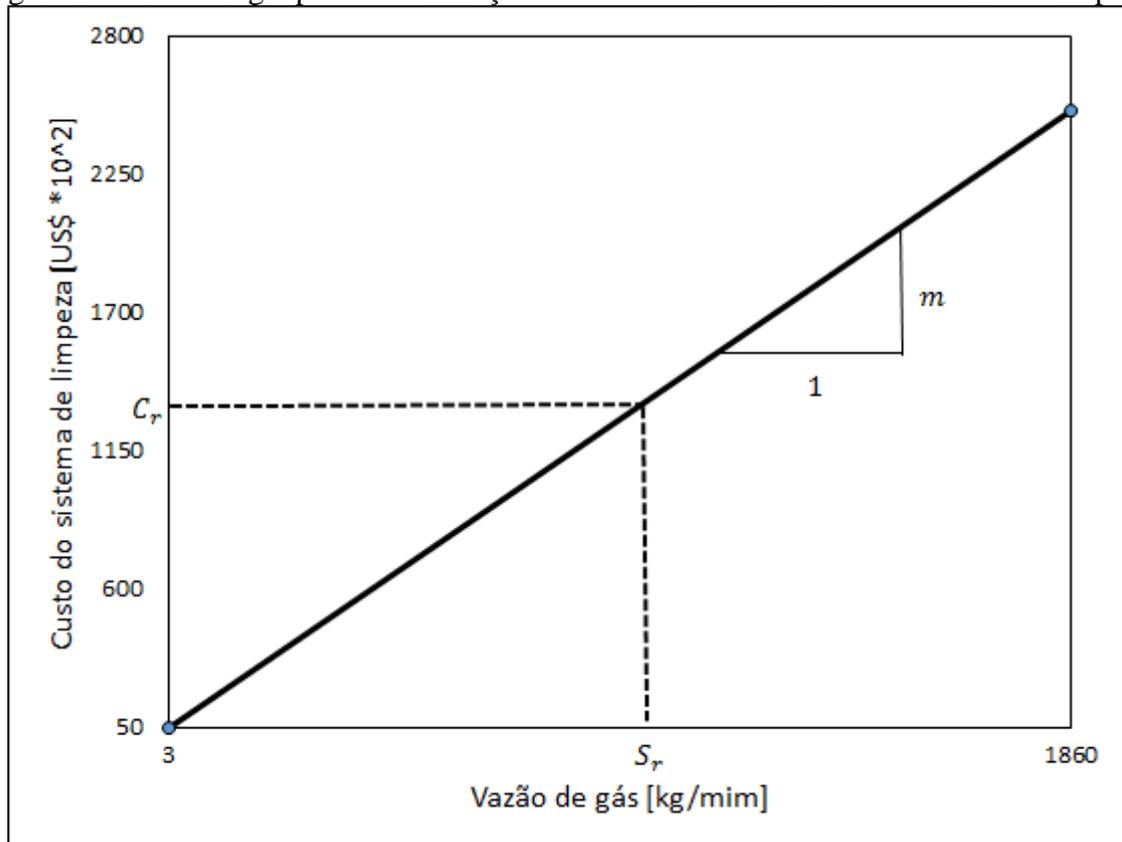
Inv_{TC} : investimento no trocador de calor [US\$]

$Q_{gás}$: fluxo de calor produzido no trocador de calor [kW]

5.5.3 Investimento no sistema de limpeza

Para determinar o investimento no sistema de limpeza foi utilizada a metodologia da Técnica de Boehm (1987), conforme equação (5.12) e figura 9, considerando o custo de investimento do sistema de limpeza dos gases com capacidade na faixa de 3 (que custa US\$5000,00 (ALIBABA, 2021)) a 1860 kg/min (que custa US\$ 250000,00 (IBSEN, 2006)).

Figura 20: Metodologia para determinação do custo de investimento do sistema de limpeza



Fonte: Elaborado pelo autor

Após aplicação da metodologia de Boehm (1987), acrescentou o fator de 1,37 que representa a inflação do dólar de 2006-2021 (SIMULADOR INFLAÇÃO DÓLAR, 2021), e determinou-se a equação (5.15) para o custo de investimento do sistema de limpeza na faixa de 3 a 1860 kg/min.

$$Inv_{SL} = 1250. \left(\frac{m_{gás.min}}{928,5} \right)^{0,74} \cdot 10^2 \cdot (1,37) \quad (5.15)$$

Inv_{SL} : investimento do sistema de limpeza do syngas [US\$]

$m_{gás.min}$: fluxo mássico de syngas por minuto no sistema de limpeza [kg/min]

5.5.4 Investimento no motor de combustão interna

Xavier (2016) desenvolveu a equação (5.16) para o investimento no MCI. A esta equação acrescenta-se o fator de 1,15 que representa a inflação do dólar de 2016-2021 (SIMULADOR INFLAÇÃO DÓLAR, 2021),

$$Inv_{MCI} = 400 * \left(\frac{\dot{E}_{p.MCI}}{455} \right)^{0,9021} . 10^3 . (1,15) \quad (5.16)$$

Onde:

$\dot{E}_{p.MCI}$: eletricidade produzida no motor de combustão interna [kW]

Inv_{MCI} : investimento no motor de combustão interna [US\$]

5.5.5 Investimento no conjunto turbina a gás

O investimento no conjunto turbina a gás depende da seleção realizada através do Handbook Gas Turbine World (2012). Ao valor de investimento apresentado no Handbook Gas Turbine World é inserido o fator de 1,20 que representa a inflação do dólar de 2012-2021 (SIMULADOR INFLAÇÃO DÓLAR, 2021), a equação de investimento no conjunto turbina a gás é apresentação na tabela 20 da seção 6.2.3.

5.5.6 Investimento no compressor de gás

Na configuração 2 há necessidade de um compressor de gás, e para determinar o seu investimento é utilizada a equação (5.17) adaptada de Silveira e Tuna (2003) e inserido o fator de 1,50 que representa a inflação do dólar de 2003-2021 (SIMULADOR INFLAÇÃO DÓLAR, 2021).

$$Inv_{C.gás} = \left(\frac{75 \cdot \dot{m}_6}{0,9 - \eta_C} \right) \cdot \left(\frac{P_7}{P_6} \right) \cdot \ln \left(\frac{P_7}{P_6} \right) \cdot (1,50) \quad (5.17)$$

$Inv_{C.gás}$: investimento no compressor de gás [US\$]

\dot{m}_6 : fluxo mássico de gás no ponto 6 [kg/s]

η_{isoC} : eficiência isoentrópica do compressor [80%] (VILLELA, 2007)

P_6 : pressão do gás no ponto 6 do compressor de gás [kPa]

P_7 : pressão do gás no ponto 6 do compressor de gás [kPa]

5.5.7 Receita anual

Para avaliar o período de retorno dos investimentos é determinada a receita anual, que considera o preço de venda da eletricidade, o custo e a produção de eletricidade para cada configuração, o custo de descarte do RSS, o período equivalente de utilização e a eletricidade requerida na tocha, conforme equação (5.18) (adaptado PAULINO, 2019).

$$R_{anual} = [(P_{v.el.} - C_{el.Y}) * (\dot{E}_{pY} * H)] + C_{descarte.RSS} - [P_{el.} * H * E_{tocha}] \quad (5.18)$$

*O índice Y corresponde ao equipamento conforme a configuração que está determinando a receita anual.

Onde:

$C_{descarte.RSS}$: custo de descarte do RSS [US\$/ano]

$C_{el.X}$: custo de produção da eletricidade [US\$/ kWh]

H : período equivalente de utilização [h]

$P_{el.}$: tarifa de eletricidade [US\$/kWh]

\dot{E}_{pY} : potência elétrica produzida no MCI ou CTG [US\$/kWh]

E_{tocha} : potência elétrica requerida na tocha [US\$/kWh]

$P_{v.el.}$: preço de venda da eletricidade produzida em cada configuração [US\$/kWh]

R_{anual} : receita anual [US\$/ano]

Na referência é encontrado o custo de descarte do RSS e não só o custo de destruição por autoclave ou incineração, então para obter o custo de destruição é subtraído o custo de transporte do RSS do valor do custo de descarte. E o custo de transporte do RSS equivale a 20% do custo de descarte deste resíduo (PREFEITURA DE RIBEIRÃO PRETO, 2021). O custo de destruição do RSS é obtido através da equação (5.19).

$$C_{destruição.RSS} = C_{descarte.RSS} - C_{transporte} \quad (5.19)$$

Onde:

$C_{descarte.RSS}$: custo de descarte do RSS [US\$/ano]

$C_{destruição.RSS}$: custo de destruição do RSS [US\$/ano]

$C_{transporte}$: custo de transporte do RSS [US\$/ano]

$C_{el.X}$: custo de produção da eletricidade [US\$/ kWh]

H : período equivalente de utilização [h]

$P_{el.}$: tarifa de eletricidade [US\$/kWh]

E_{tocha} : potência elétrica requerida na tocha [US\$/kWh]

$P_{v.el.}$: preço de venda da eletricidade produzida em cada configuração

R_{anual} : receita anual [US\$/ano]

6 ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

6.1 ESTUDO DE CASO

A cidade de São Paulo, estado de São Paulo - Brasil, foi a escolhida para a realização dos estudos de dimensionamento do gaseificador a plasma, energéticos, exergéticos e econômicos, devido ser a maior cidade do país, possuindo 12,33 milhões de habitantes (IBGE, 2021), contendo 27 mil estabelecimentos cadastrados para a coleta de RSS. De acordo com dados da SISCOR, em 2019 foram coletadas 33517 toneladas de RSS de grandes geradores de resíduos de saúde, enquanto que no ano de 2020 foi coletada a quantia maior - 36872 toneladas. Até abril de 2021 já foram coletadas 14761 toneladas de RSS com estimativa de alcançar mais de 44 mil toneladas até final do ano. As tabelas 10 e 11 apresentam a produção de RSS em toneladas para pequenos e grandes geradores da cidade São Paulo, respectivamente.

Tabela 10 – Produção de RSS (toneladas) - pequenos geradores

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maió	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
2016	530	564	644	639	617	652	629	665	615	685	608	625	7471
2017	555	587	667	584	746	665	675	737	699	725	701	667	8008
2018	643	617	730	711	717	725	694	800	697	802	723	711	8569
2019	697	719	757	780	838	705	811	831	748	800	739	702	9128
2020	729	691	734	540	597	710	823	803	824	861	806	833	8951
2021	753	813	895	811	872								4145

Fonte: Prefeitura de São Paulo -SISCOR (2021)

Tabela 11 – Produção de RSS (toneladas) - grandes geradores

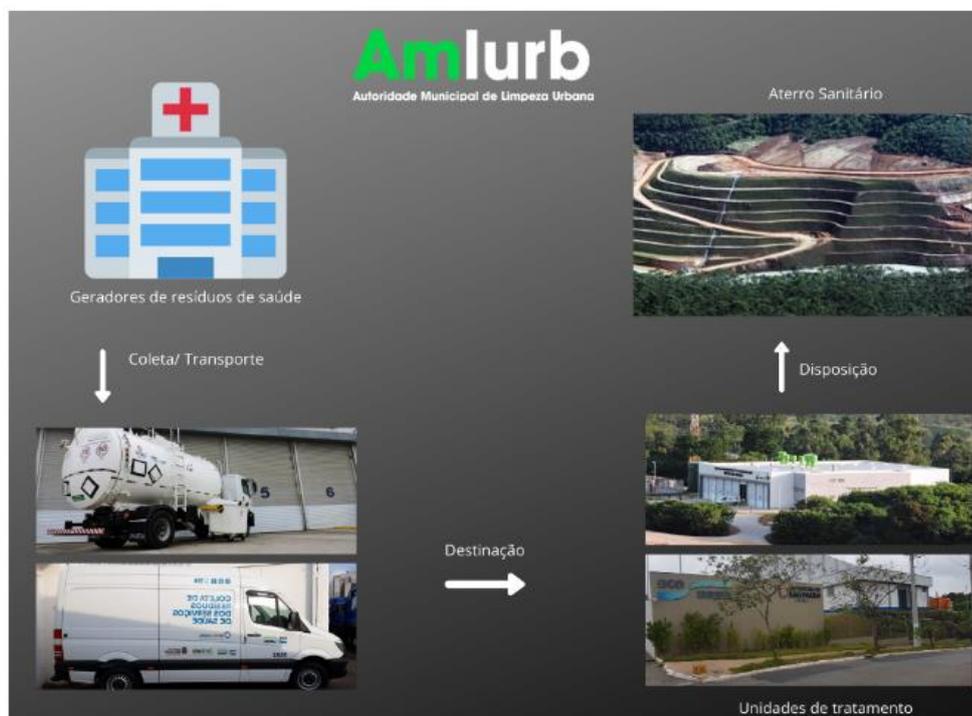
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maió	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
2016	2561	2603	2965	2885	2864	2880	2883	2932	2738	2778	2760	2962	33542
2017	2691	2586	2959	2730	3003	2897	2903	2950	2797	2865	2755	2667	33803
2018	2723	2541	2956	2869	2912	2801	2806	2931	2718	2928	2728	2650	33562
2019	2722	2648	2792	2886	2973	2758	2861	2861	2751	2907	2710	2649	33517
2020	2711	2589	2727	2488	3017	3292	3476	3395	3251	3308	3281	3337	36872
2021	3370	3334	4188	3869	3921								18682

Fonte: Prefeitura de São Paulo -SISCOR (2021)

De acordo com as informações apresentadas no site da Prefeitura de São Paulo (2021), os estabelecimentos devem disponibilizar os RSS nos dias e horários determinados pela prefeitura

conforme determina a Legislação Resolução Colegiada RDC 306 de 07/12/2004 e os resíduos dos grupos A, B e E são coletados segundo a Resolução CONAMA 358/2005. Para o transporte dos resíduos é necessário que os estabelecimentos gerem uma documentação especificando a classificação, a identificação do expedidor, a quantidade e o tipo de acondicionamento a que estão submetidos os resíduos, a identificação do transportador e da instalação de tratamento. Posteriormente a coleta, os RSS são direcionados para unidades de tratamento devidamente licenciados pelo órgão ambiental. Assim que os RSS chegam a estas unidades, são submetidos ao tratamento através de autoclaves, onde são exposto ao calor (temperatura de até 150° C) e umidade á alta pressão por um período de tempo adequado para eliminar todos os possíveis microrganismos que possam contaminar a natureza e prejudicar a saúde humana. A tecnologia de autoclave assegura níveis de inativação microbiana estabelecidos pela legislação brasileira e internacionalmente reconhecidos. Após o processamento na autoclave, o RSS descontaminado passa pelo processo de trituração e é encaminhado até um aterro sanitário. A figura 21, mostra o fluxograma do caminho que o RSS percorre da coleta até o aterro sanitário.

Figura 21 – Fluxograma do caminho percorrido pelo RSS da coleta até o aterro sanitário



Fonte: Prefeitura de São Paulo (2021)

A cidade de São Paulo classifica o Estabelecimento Gerador de Resíduos Sólidos de Serviços de Saúde (EGRS) em pequeno ou grande gerador de RSS. Os estabelecimentos que

são considerados pequenos geradores de RSS são divididos em 3 grupos, conforme tabela 12. E os estabelecimentos que são considerados grandes geradores são divididos em 6 grupos, conforme tabela 13.

Tabela 12: Produção diária de RSS - Pequenos geradores de RSS

Grupos	Produção diária de RSS [kg/dia]
EGRS especial - I	até 5
EGRS especial - II	5 - 10
EGRS especial - III	10 - 20

Fonte: Prefeitura de São Paulo (2021)

Tabela 13: Produção diária de RSS - Grandes geradores de RSS

Grupos	Produção diária de RSS [kg/dia]
EGRS 1	20 - 50
EGRS 2	50 - 160
EGRS 3	160 - 300
EGRS 4	300 - 650
EGRS 5	650 - 800
EGRS 6	acima de 800

Fonte: Prefeitura de São Paulo (2021)

A cidade de São Paulo instituiu a Taxa de Resíduos Sólidos de Serviços de Saúde (TRSS) para subsidiar os serviços de coleta, transporte, tratamento e destinação final do RSS. Para cada EGRS está prevista um valor de TRSS, as tabelas 14 e 15 apresentam valores para pequenos e grandes geradores de RSS, respectivamente.

Tabela 14 – TRSS para pequenos geradores de RSS

Grupos	Valor Mensal ano2021 [R\$]
EGRS especial - I	59,47
EGRS especial - II	79,29
EGRS especial - III	118,94

Fonte: Prefeitura de São Paulo (2021)

Tabela 15 – TRSS para grandes geradores de RSS

Grupos	Valor Mensal ano 2021 [R\$]
EGRS 1	3.786,91
EGRS 2	12.118,07
EGRS 3	22.721,72
EGRS 4	49.229,72
EGRS 5	60.590,41
EGRS 6	90.887,12

Fonte: Prefeitura de São Paulo (2021)

Para a análise econômica será considerada a produção máxima de cada grupo e a respectiva TRSS por kg. As tabelas 16 e 17 apresentam a TRSS em R\$/kg para pequenos e grandes geradores, respectivamente.

Tabela 16 – TRSS para pequenos geradores de RSS

Grupos	[R\$/kg]
EGRS especial - I	0,39
EGRS especial - II	0,26
EGRS especial - III	0,20

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 17: TRSS para grandes geradores de RSS

Grupos	[R\$/kg]
EGRS 1	2,52
EGRS 2	2,52
EGRS 3	2,52
EGRS 4	2,52
EGRS 5	2,52
EGRS 6	abaixo de 3,79

Fonte: Elaborado pelo autor

Considerando a coleta e descarte do RSS pela cidade de São Paulo, o aumento da geração de RSS devido a pandemia COVID -19, pelo seu alto custo de descarte, faz-se necessário o estudo de viabilidade da implementação de uma tecnologia de gaseificação a plasma como uma

tecnologia alternativa do processamento de RSS, devido a elevada produção deste resíduo, o destino final não ser o mais adequado (aterro sanitário) e o não aproveitamento do seu poder energético.

E ainda, com finalidade de fazer uma comparação da análise econômica, também é considerado o cenário da incineração. Considera-se que, ao invés de processar o RSS em autoclave, triturar e depois levar para o aterro, o RSS é incinerado. E de acordo com LUFTECH soluções ambientais(2021), o valor médio cobrado por kg de RSS é de R\$ 2,50 a R\$ 5,00 (conforme concorrência). Para este trabalho é considerado o valor médio de R\$3,75.

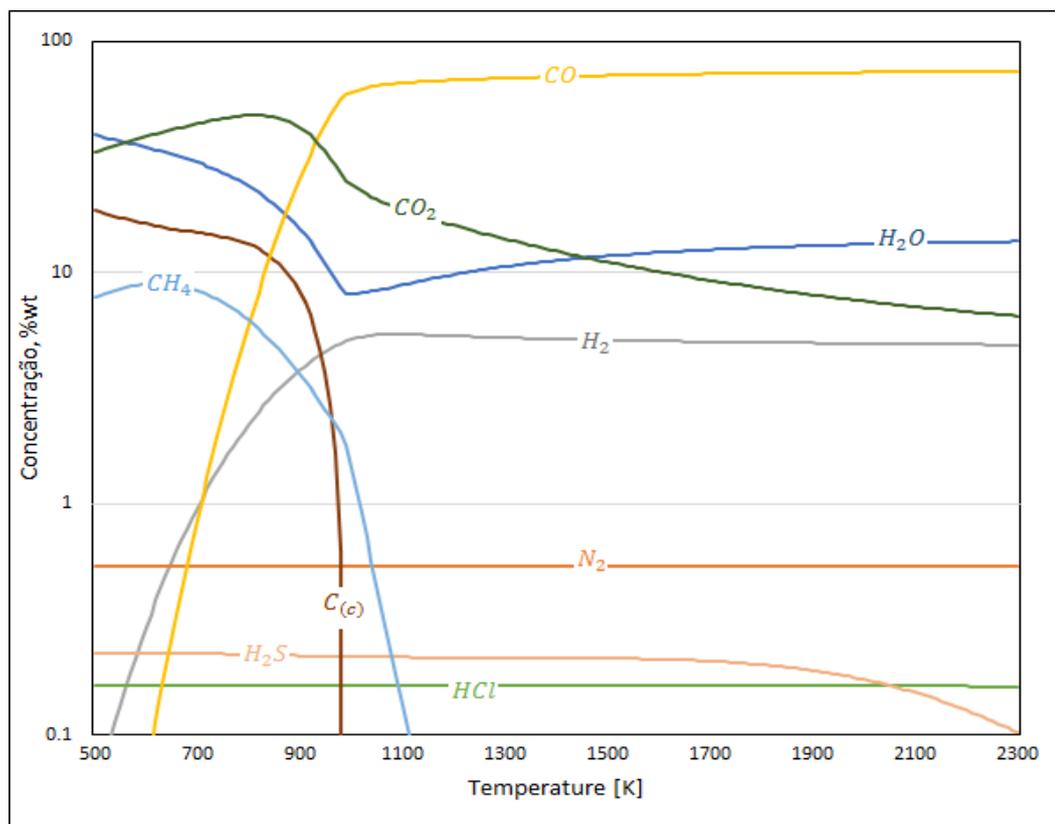
6.2 RESULTADOS

6.2.1 Resultados do dimensionamento do gaseificador

Para a determinação da composição e quantidade do gás produzido na gaseificação a plasma de RSS, a análise termodinâmica para o sistema em estado de equilíbrio foi realizada para a faixa de temperatura de 300 até 2300 K e pressão atmosférica de 0,1 MPa. Primeiramente, foi analisada a composição da matéria-prima. Como segue na Tabela 2 da seção 2.3, os principais componentes em massa do RSS são: oxigênio (37,3%), carbono (31,6%) e água (20,8%).

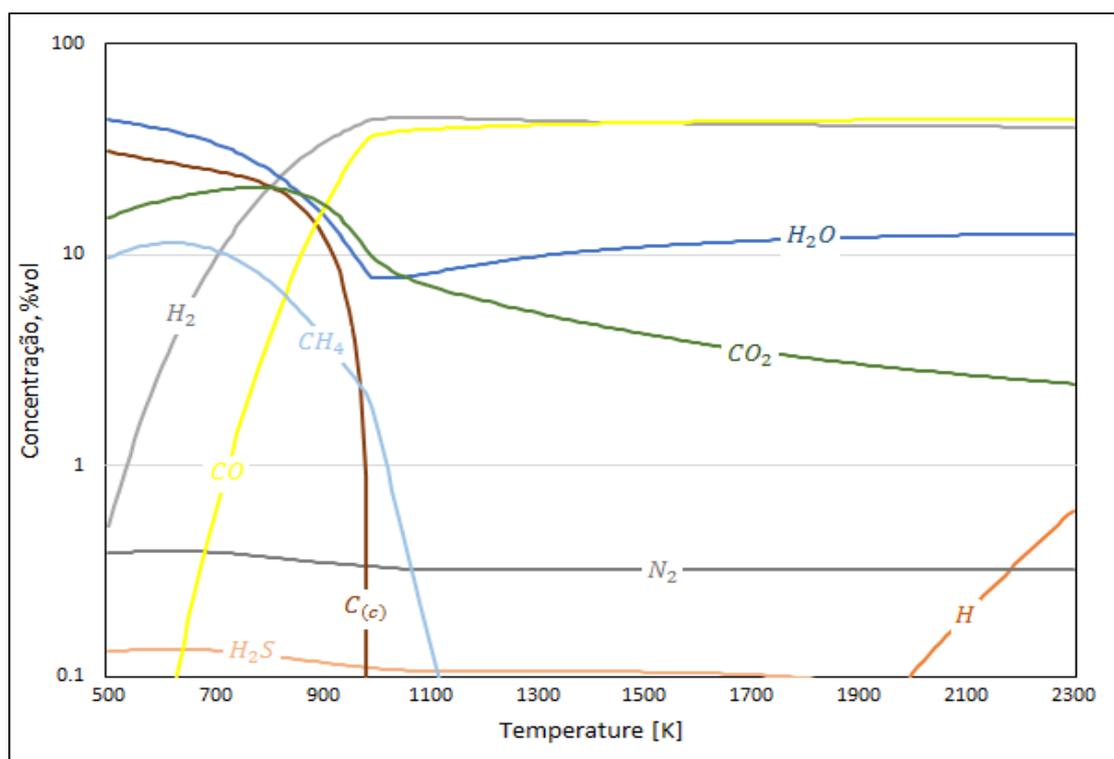
A variação na composição dos gases formados durante o processo de tratamento de RSS via pirólise, sem adicionar um oxidante, é mostrada nas figuras 22 e 23 para temperaturas de 500 K a 2300K. Na análise termodinâmica, foram assumidos os valores médios dos componentes do RSS.

Figura 22 – Fração de massa, % wt, de espécies no gás produzido de tratamento RSS



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23 – Fração de volume, % vol, de espécies no gás produzido de tratamento de RSS



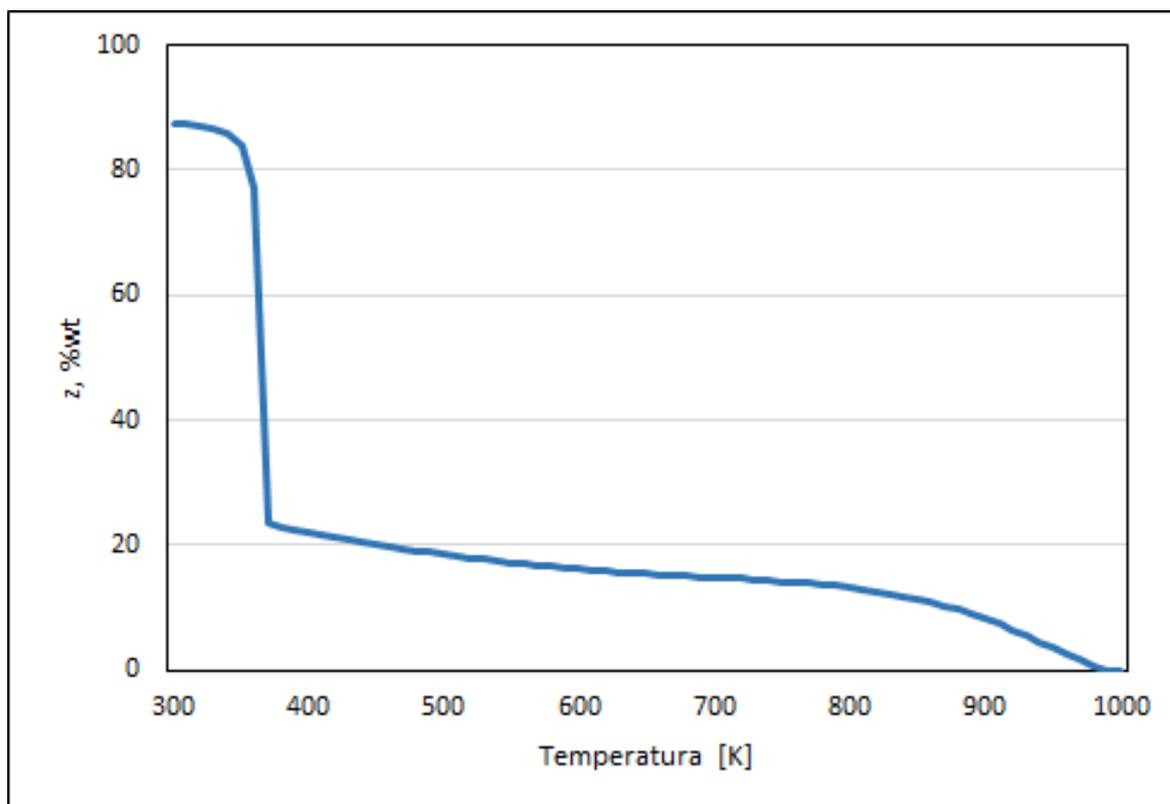
Fonte: Elaborado pelo autor

Através das figuras pode-se observar que, a concentração de gás de síntese (mistura de H_2 e CO) aumenta com a elevação da temperatura até a temperatura em torno de 1000 K. Após este ponto, a quantidade de gás de síntese permanece praticamente invariável até altas temperaturas, quando se inicia o processo de dissociação de H_2 e CO . O gás produzido é composto principalmente por gás de síntese que ocupa 80,81% do volume total (36,98% vol CO e 43,83% vol H_2).

Praticamente todo carbono é consumido no processo até a temperatura de 1000 K. Nessa temperatura, além do syngas, encontram-se os principais contaminantes em volume (% vol) como: 1,54% CH_4 (1,54%, desaparecendo acima de 1100 K), 9,37% CO_2 (diminuindo com a temperatura) e 7,74% H_2O (aumenta com a temperatura). A concentração de nitrogênio (N_2) permanece quase inalterada para temperaturas acima de 1000 K e atinge apenas 0,33 % vol. O poluente sulfeto de hidrogênio (H_2S) é encontrado em 0,13 - 0,10% em volume para temperatura até 1000 K e desaparece (concentração abaixo de 0,1% vol.) após 1800 K. A concentração máxima de CO_2 é observada na temperatura de 780 K e com aumento da temperatura diminui gradualmente. Ao contrário, o vapor de água tem um valor mínimo (7,70%) para uma temperatura de 1000K e aumenta ligeiramente com o aumento da temperatura.

A simulação do processamento do resíduo sólido do serviço de saúde mostra uma variação da quantidade de matéria condensada, isto é apresentado na figura 24.

Figura 24 – Variação da matéria condensada no processamento de RSS

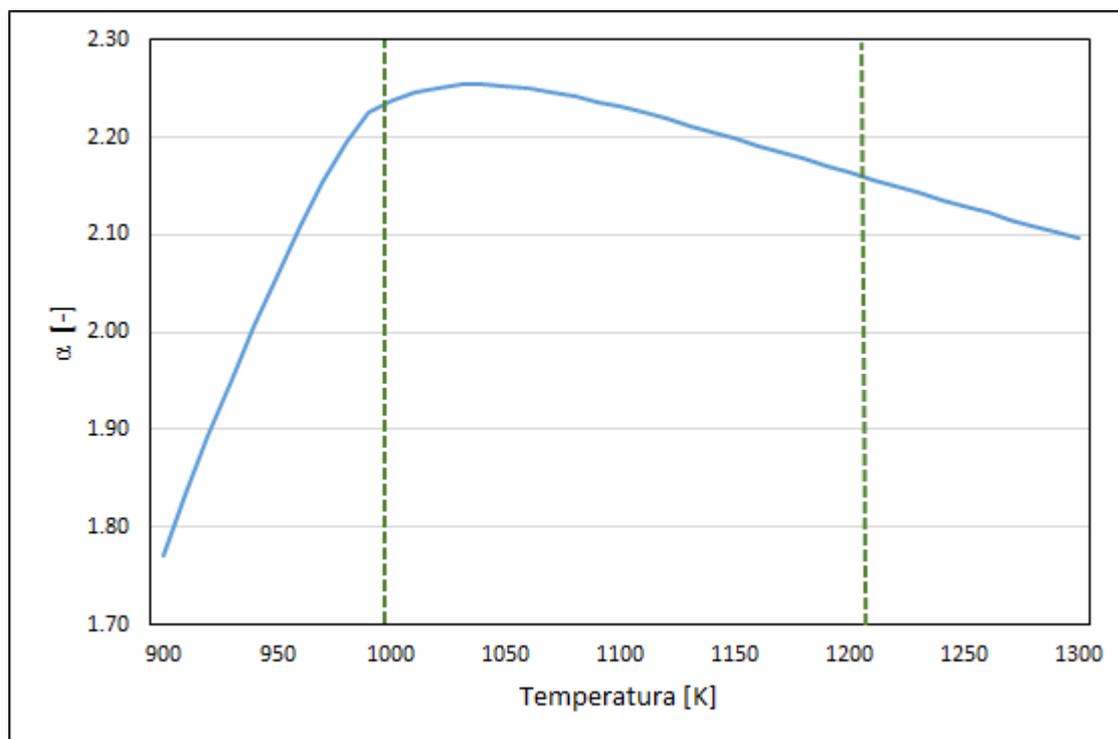


Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se na figura 24 que para temperaturas abaixo de 373K a concentração de matéria em estado sólido está acima de 80%. Considerando a temperatura de 1000 K, para as temperaturas inferiores, a quantidade de resíduos do processo (cinzas + carbono fixo) aumenta em aproximadamente 10-20%. Por fim, o processo de pirólise mostra-se ideal para temperaturas acima de 1000 K, onde todo carbono fixo é reagido.

Para determinar o melhor ponto de operação da gaseificação a plasma do RSS, a figura 25 mostra a variação do rendimento energético do gás de síntese com a temperatura.

Figura 25 – Variação do rendimento energético do gás de síntese em função da temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor

Através da figura 25 observa-se que o maior rendimento pode ser alcançado a uma temperatura de 1040 K. Normalmente, a temperatura dentro do reator varia devido à presença de fontes (jato de plasma e/ou arco elétrico) e sumidouros (material processado, parede do reator e canal de exaustão). Isso também força a variar a temperatura no interior do reator. Supondo que uma variação de 5% em α (T) seja permitida no processo de tratamento de RSS, pode-se obter uma faixa de temperatura operacional. Para este caso, a temperatura permitida pode variar de 1000 K (limitada pelo consumo de carbono) a 1210 K. Os limites de variação são mostrados por linhas pontilhadas na figura.

Para a análise termodinâmica da configuração 1 (sistema de gaseificação a plasma associado ao motor de combustão interna) e da configuração 2 (sistema de gaseificação a plasma associado ao conjunto turbina a gás), foi considerada a composição química do gás produzido na temperatura com $\alpha = \alpha_{máx}$. A partir da figura 25, observa-se que o valor $\alpha_{máx}$ é 2,25 o que corresponde a uma temperatura de 1040 K. Para esta temperatura o gás de síntese consiste em 63,65% em massa (ou 38,31% em volume) de monóxido de carbono e 5,35% em massa (ou 44,71% em volume) de hidrogênio, o volume específico de 5,130 m³/kg, a diferença de entalpia (ΔH) é 5673 kJ/kg e o PCI é de 13754 kJ/kg. A fração de massa das espécies principais e % em volume são mostradas na tabela 18 e 19, respectivamente .

Tabela 18 – Fração mássica dos elementos que compõe o gás produzido na gaseificação de plasma de RSS

Elementos	H ₂	H ₂ O	HCl	H ₂ S	N ₂	CO	CO ₂	CH ₄
Fração mássica [-]	0,0535	0,0829	0,0016	0,0022	0,0054	0,6365	0,2121	0,0057

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 19 – Porcentagem em volume dos elementos que compõe o gás produzido na gaseificação de plasma de RSS

Elementos	H ₂	H ₂ O	HCl	H ₂ S	N ₂	CO	CO ₂	CH ₄
Fração mássica [-]	44,71	7,76	0,0756	0,1073	0,3250	38,30	8,12	0,5963

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 20 apresenta uma comparação entre os resultados da composição do syngas em % vol da gaseificação a plasma do RSS brasileiro e outros trabalhos disponíveis na literatura.

Tabela 20 – Comparação da composição do gás de síntese em % vol

Resultados	Este estudo	Erdogan et. al (2021)	Indrawan et. al (2019)	Messerle et. al (2016)
H ₂	44.70	27.96	24.4 – 33.80	24.7 0– 46.80
CO	36.98	20.77	22.00 – 30.90	28.7 – 38.10

Fonte: Erdogan et. al (2021), Indrawan et. al (2019), Messerle et. al (2016)

Após a determinação do ponto de operação do gaseificador a plasma e a composição do syngas, é determinado as principais dimensões do gaseificador.

Para este trabalho o gaseificador é de formato cilíndrico e é considerado o processamento do saco de RSS de 100 l (20 kg), que é o maior recipiente dado pelos padrões da ABNT NBR 9191/750 que pode ser usado para armazenar resíduos sólidos do serviço de saúde, para determinar os parâmetros de forma que todos os outros sacos de RSS de volume inferior possam ser processados no reator sem modificação no diâmetro de entrada de RSS.

Para validar as equações obtidas neste trabalho, é dimensionado um gaseificador a plasma de 2 TPD para comparar com as dimensões do reator apresentado no trabalho de Erdogam publicado em agosto de 2021 para esta mesma capacidade.

A tabela 21 mostra os resultados dos parâmetros utilizados para o dimensionamento do gaseificador a plasma de 2 TPD.

Tabela 21 – Parâmetros para o dimensionamento do gaseificador para 2 TPD

Parâmetros	
Número de saco de RSS inseridos no reator simultaneamente ($N_{saco.RSS}$) [-]	1
Fluxo mássico de RSS (\dot{m}_{RSS}) [kg/s]	0,023
Fluxo mássico de gás ($\dot{m}_{gás}$) [kg/s]	0,021
Fluxo mássico de cinzas (\dot{m}_{cinzas}) [kg/s]	0,002
Massa específica do gás ($\rho_{gás}$) [kg/m ³]	0,195

Fonte: Elaborado pelo autor

A potência elétrica da tocha para o processamento de 0,023 kg/s de RSS é 138,24 kW, e para esta situação são utilizadas 2 tochas, cada tocha requer 69,12 kW. Para garantir o funcionamento ininterrupto do reator (caso precise de uma manutenção) é indicado a instalação de 2 tochas de 100 kW, que irão trabalhar em carga parcial no dia a dia e em carga total no período de manutenção. A partir dos parâmetros da tabela 20, são calculadas as principais dimensões do gaseificador a plasma para capacidade de 2 TPD (0,023 kg/s), conforme tabela 22.

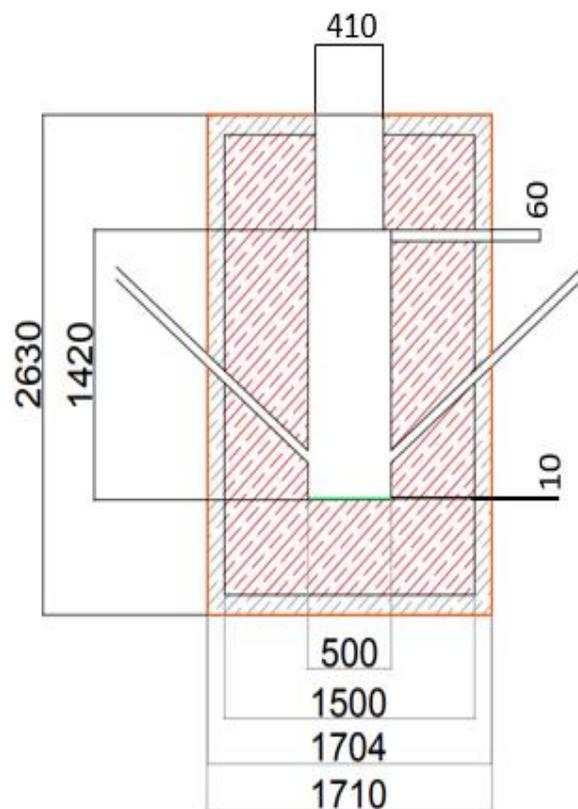
Tabela 22 – Principais dimensões do gaseificador a plasma para 2 TPD

Dimensões do gaseificador	Valores	Valores
	obtidos [m]	comercialmente disponíveis [m]
Diâmetro de entrada de RSS (d_1) [m]	0,402	0,410
Diâmetro de saída de cinzas (d_2) [m]	0,010	0,010
Diâmetro de saída do gás (d_3) [m]	0,053	0,060
Diâmetro interno do gaseificador a plasma (D_i)	0,500	-
Diâmetro total do gaseificador (D_{total}) [m]	1,710	-
Altura interna do gaseificador a plasma (H_i)	1,420	-
Altura total do gaseificador (H_{total}) [m]	2,630	-
Espessura do material isolante (e_i) [m]	0,500	-
Espessura do manta térmica (e_m) [m]	0,102	-
Espessura do revestimento de aço (e_a) [m]	0,003	-

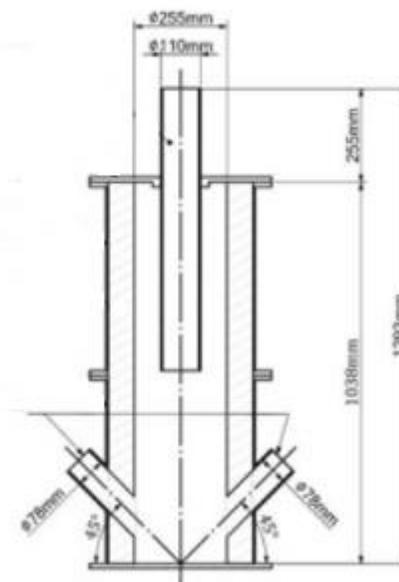
Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 26 (a) apresenta o desenho do gaseificador a plasma com a vista frontal em corte para comparar com a figura 26 (b) projeto do gaseificador a plasma apresentado no trabalho de Erdogam et al. (2021).

Figura 26: (a) Gaseificador a plasma dimensionado para 2TPD e (b) Gaseificador a plasma para 2 TPD proposto por Erdogam et al. (2021)



(a)



(b)

Fonte: (a)Elaborado pelo autor e (b) Erdogam et al. (2021)

Através das figuras 26 (a) e 26 (b) é possível verificar que há uma proporcionalidade na relação H_i/D_i , que é de aproximadamente 4 para ambas. A posição de saída do gás é diferente, na figura (a) é na região lateral e na (b) é na região superior, assim o diâmetro de saída dos gases são diferentes, com valor de 60 e 110 mm, respectivamente, devido a diferente velocidade do gás (syngas) considerada em cada modelo. A entrada de RSS é na parte superior em ambas as figuras, mas na figura (a) é considerado que o saco de RSS seja compactado e inserido diretamente no gaseificador e na figura (b) o resíduo também entra pela parte superior, mas numa área ao redor da tubulação de saída do gás. Ambos os projetos, apesar da entrada de RSS ser diferentes, prezam pelo princípio de aproveitar o calor do gás para pré-aquecimento do RSS, conforme desce pela extensão do reator até passar pelas tochas a plasma. O diâmetro total e altura total do gaseificador são um pouco diferentes, devido ao projeto da figura (a) ter espessura do isolamento térmico composto por placa cerâmica, manta térmica e revestimento de aço inox, e considerando relativamente baixa a temperatura da parede externa; o projeto da figura (b) considera o sistema de isolamento apenas com tijolo a prova de fogo e revestimento de aço. Desta forma, há uma similaridade em pontos específicos onde o projeto tem o mesmo princípio, como a relação H_i/D_i e diâmetro de saída de gás. Com isso, é possível alegar que as equações elaboradas neste trabalho tem a sua validação.

A partir da validação é dimensionado um gaseificador a plasma com capacidade de 25 TPD (0,29 kg/s). A tabela 23 mostra os resultados dos parâmetros utilizados para o dimensionamento do gaseificador a plasma de 25 TPD.

Tabela 23 – Parâmetros para o dimensionamento do gaseificador para 25 TPD

Parâmetros	
Número de saco de RSS inseridos no reator simultaneamente ($N_{saco.RSS}$) [-]	4
Fluxo mássico de RSS (\dot{m}_{RSS}) [kg/s]	0,290
Fluxo mássico de gás ($\dot{m}_{gás}$) [kg/s]	0,021
Fluxo mássico de cinzas (\dot{m}_{cinzas}) [kg/s]	0,269
Massa específica do gás ($\rho_{gás}$) [kg/m ³]	0,195

Fonte: Elaborado pelo autor

A potência elétrica da tocha para o processamento de 0,290 kg/s de RSS é 1728 kW, e para esta situação são utilizadas 4 tochas (duas de cada lado), cada tocha requer 432 kW. Para evitar redução do processamento no período de manutenção é indicado utilizar 4 tochas de 500

kW. A partir dos parâmetros da tabela 19, são calculadas as principais dimensões do gaseificador a plasma para capacidade de 25 TPD (0,290 kg/s), conforme tabela 24.

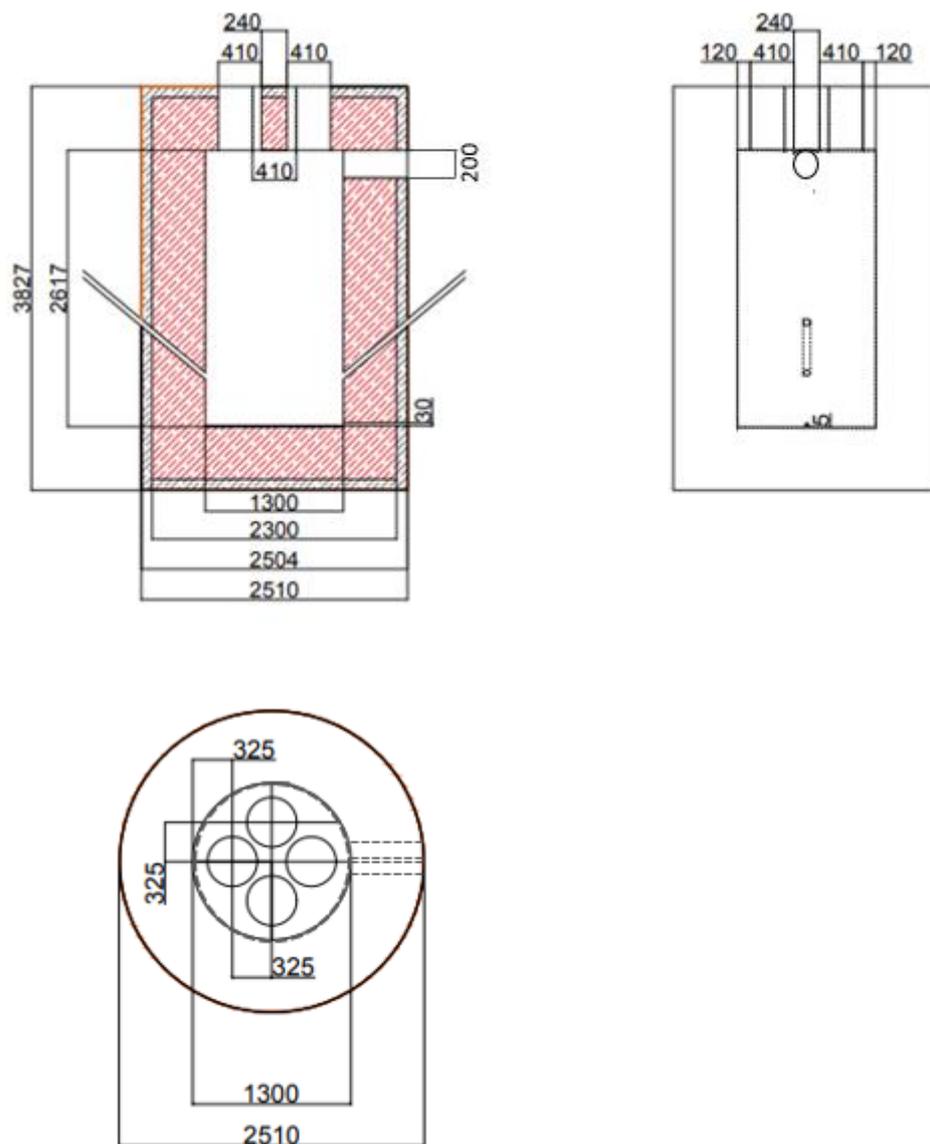
Tabela 24 – Principais dimensões do gaseificador a plasma para 25 TPD

Dimensões do gaseificador	Valores obtidos [m]	Valores comercialmente disponíveis [m]
Diâmetro de cada entrada de RSS (d_1) [m]	0,402	0,410
Diâmetro de saída de cinzas (d_2) [m]	0,030	0,030
Diâmetro de saída do gás (d_3) [m]	0,188	0,200
Diâmetro interno do gaseificador a plasma (D_i)	1,300	-
Diâmetro total do gaseificador (D_{total}) [m]	2,510	-
Altura interna do gaseificador a plasma (H_i)	2,617	-
Altura total do gaseificador (H_{total}) [m]	3,827	-
Espessura do material isolante (e_i) [m]	0,500	-
Espessura do manta térmica (e_m) [m]	0,102	-
Espessura do revestimento de aço (e_a) [m]	0,003	-

Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 27 apresenta o desenho do gaseificador a plasma com a vista frontal em corte, vista lateral e vista superior, conforme dimensões apresentadas na tabela 23.

Figura 27 : vistas do gaseificador a plasma de 25 TPD



Fonte: Elaborado pelo autor

6.2.2 Resultados da análise energética

Com a determinação do melhor ponto de operação, com a correspondente temperatura e composição química do gás foi possível fazer os cálculos termodinâmicos em cada equipamento de cada configuração. E a partir das propriedades termodinâmicas foi possível obter: os fluxos mássicos em todos os pontos do ciclo, o potencial de produção de eletricidade tanto no motor de combustão interna quanto no conjunto turbina a gás a partir da queima do gás oriundo da gaseificação a plasma, a demanda de eletricidade na tocha a plasma, a porcentagem de eletricidade que o MCI ou CTG consegue suprir da demanda na tocha.

Para análise termodinâmica é considerada a produção de RSS dos grandes geradores da cidade de São Paulo, que no ano de 2020 foi o total de 36872 toneladas. É considerado pirólise, então não haverá fluxo mássico de oxidante no ponto 2. E ainda a temperatura de saída do gás de exaustão do MCI e TG é obtida através dos catálogos aos quais foram selecionados. As tabelas 25 e 26 apresenta as propriedades de cada ponto do sistema gaseificação a plasma de RSS associado ao motor de combustão interna e conjunto turbina a gás, respectivamente.

Tabela 25 – Propriedades termodinâmicas da gaseificação a plasma de RSS associado ao MCI

Ponto	\dot{m} [kg/s]	T [° C]	P [kPa]	h [kJ/kg]	s[kJ/kg/K]	c_p [kJ/kg.K]
1	1,17	25	100	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-
3	0,08	767	100	-	-	-
4	1,09	767	116	-	-	1,877
5	1,09	460	110	-	-	1,869
e	0,14	25	100	105	0,367	-
s	0,14	100	100	2676	7,361	-
6	1,09	460	105	-	-	1,869
7	2,54	25	100	-	-	1,004
8	3,62	377	100	-	-	1,118

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 26 – Propriedades termodinâmicas da gaseificação a plasma de RSS associado ao CTG

Ponto	\dot{m} [kg/s]	T [° C]	P [kPa]	h [kJ/kg]	s[kJ/kg.K]	c_p [kJ/kg.K]
1	1,17	25	100	-	-	
2	-	-	-	-	-	
3	0,08	767	100	-	-	
4	1,09	767	110	-	-	1,877
5	1,09	320	105	-	-	1,853
e	0,22	25	100	105	0,367	-
s	0,22	100	100	2676	7,361	-
6	1,09	320	100	-	-	1,853
7	1,09	883	1030	-	-	1,837
8	5,81	25	100	-	-	1,004
9	5,81	362	1030	-	-	1,004
10	6,90	1023	1030	-	-	1,250
11	6,90	560	100	-	-	1,170

Fonte: Elaborado pelo autor

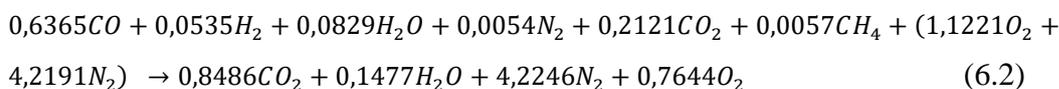
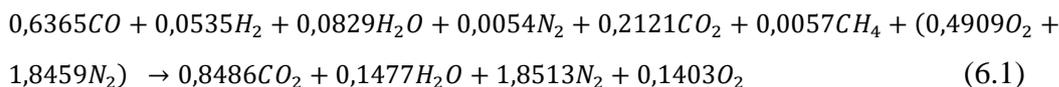
O gás produzido na gaseificação a plasma de RSS tem PCI de 13754 kJ/kg e tem capacidade de produzir 2772 kW de potência elétrica em um motor de combustão interna e 3741 kW em um conjunto turbina a gás, a diferença é devido o CTG ter maior eficiência. A tabela 27 apresenta os equipamentos selecionados para cada configuração.

Tabela 27 – Equipamentos selecionados

Equipamento	MCI	CTG
		501 – KB5S
	DM5398	(3897 kW)
Modelo	(3105 kW)	Rolls - Royce
	Caterpillar	InvTG=551.EpTG.(1,20)

Fonte: Caterpillar (2020) e Handbook (2012)

A partir da composição química do gás é possível obter a equação real da sua combustão para a configuração 1 e 2 que são apresentadas através da equação (6.1) e (6.2), respectivamente.



A tabela 28 apresenta resultados das propriedades energéticas do RSS, do gás e dos gases de exaustão, eficiência energética do gaseificador a plasma e eficiência do processo associado ao MCI e CTG.

Tabela 28 – Propriedades gerais da análise termodinâmica

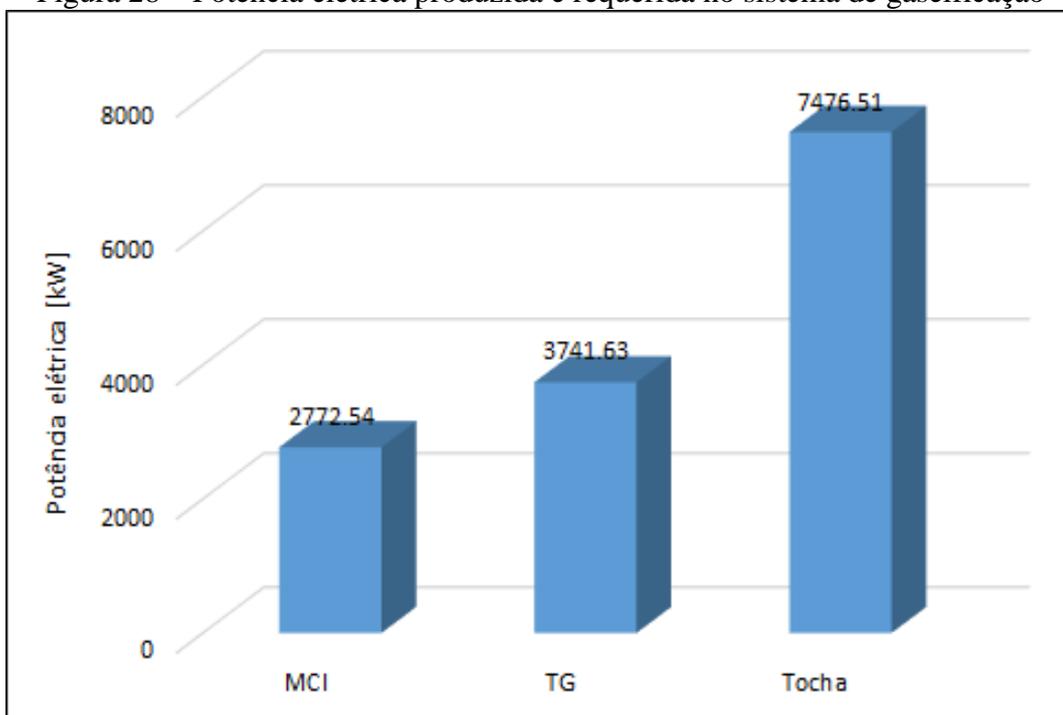
Propriedades	símbolo	valor
Calor específico médio a pressão constante do gás [kJ/kg.K]	$c_{pm.gás}$	1,87
Calor específico a pressão constante do gás de exaustão [kJ/kg.K]	c_{pG}	1,23
Energia suprida pelo gás [kW]	$\dot{E}_{gás}$	14966
Poder calorífico inferior do RSS [kJ/kg]	PCI_{RSS}	19006,00
Poder calorífico inferior do gás [kJ/kg]	$PCI_{gás}$	13754
Fluxo de calor produzido no trocador de calor pelo gás - MCI [kW]	$Q_{gás}$	438
Fluxo de calor produzido no trocador de calor pelo gás - CTG [kW]	$Q_{gás}$	909
Constante dos gases para o gás [kJ/kg.K]	$R_{gás}$	0,49
Constante dos gases para o gás de exaustão [kJ/kg.K]	R_G	0,27
Eficiência energética do gaseificador a plasma [-]	η_{gp}	49,33
Eficiência energética do processo de gaseificação a plasma associado ao MCI [-]	$\eta_{gp.el.MCI}$	9,87
Eficiência energética do processo de gaseificação a plasma associado a TG [-]	$\eta_{gp.el.TG}$	12,33
Variação de entalpia [kJ/kg]	ΔH	5673

Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 28 é apresentada a potência elétrica requerida na tocha, o potencial de produção de eletricidade no motor de combustão interna e conjunto turbina a gás utilizando syngas da gaseificação a plasma de RSS. E a figura 29 apresenta a porcentagem de eletricidade que o

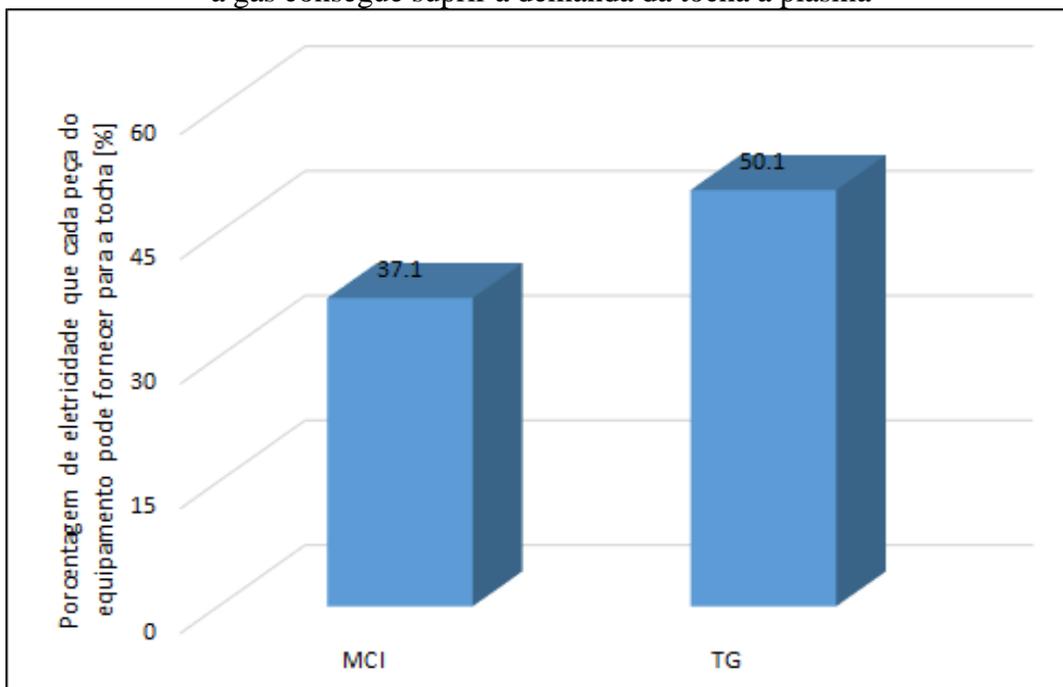
motor de combustão interna e conjunto turbina a gás consegue suprir a demanda da tocha a plasma.

Figura 28 – Potência elétrica produzida e requerida no sistema de gaseificação



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29 – Porcentagem de eletricidade que o motor de combustão interna e conjunto turbina a gás consegue suprir a demanda da tocha a plasma

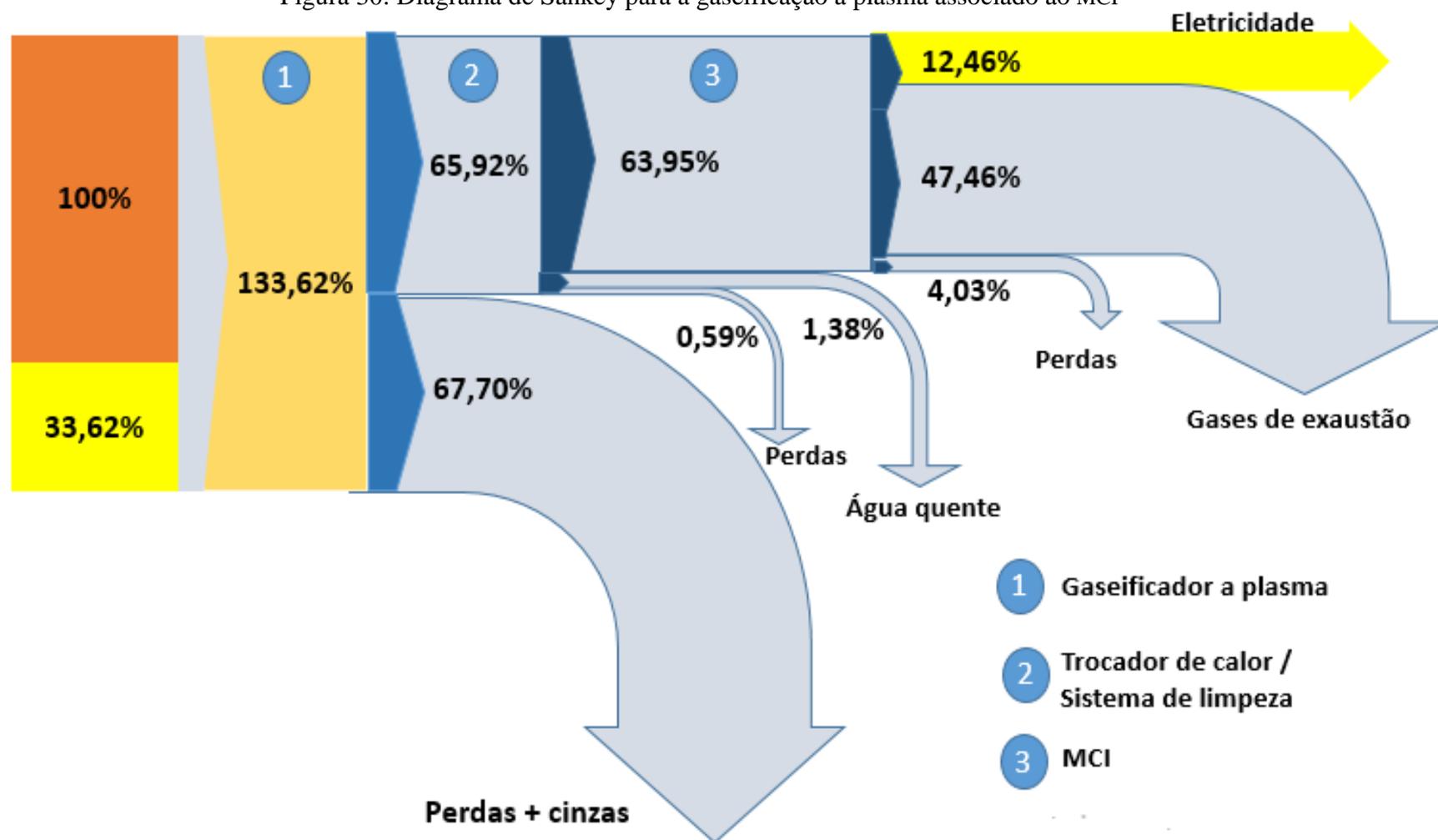


Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se através das figuras 28 que a demanda de eletricidade requerida na tocha é superior a produzida no MCI e CTG. E ainda que, o conjunto turbina a gás tem maior capacidade de produção de potência elétrica devido ter eficiência maior do que o motor de combustão interna. E através da figura 29 é possível observar que o MCI supre 37,1% e o CTG supre 50,1% da demanda de eletricidade da tocha a plasma. Desta forma, é mais viável instalar um conjunto de gaseificação a plasma associado ao conjunto turbina a gás, conforme configuração 2.

Com base na análise energética foi elaborado o diagrama de Sankey para a configuração 1 e 2 e são apresentados nas figuras 30 e 3', respectivamente, para mostrar onde estão as maiores perdas de energia.

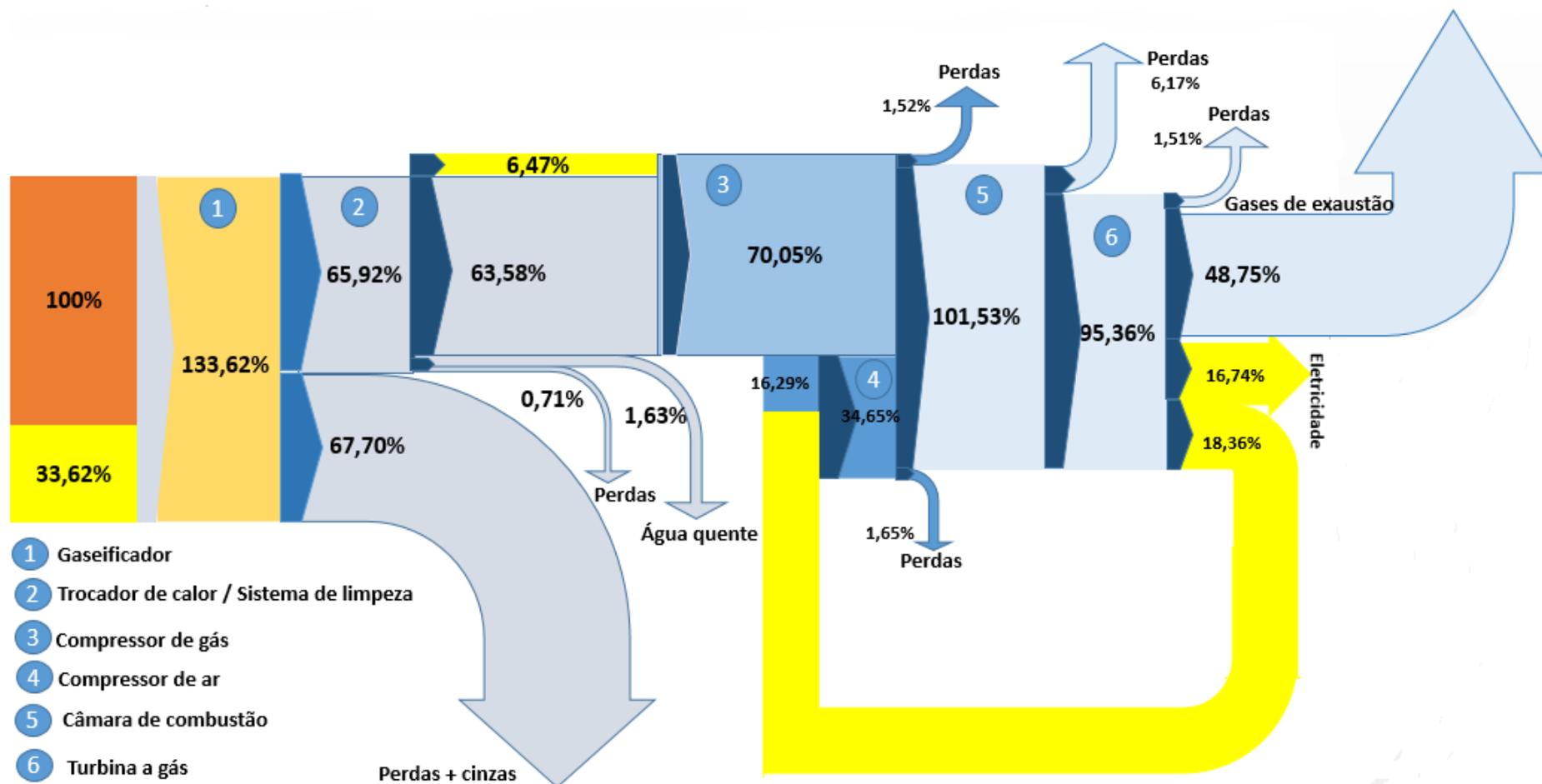
Figura 30: Diagrama de Sankey para a gaseificação a plasma associado ao MCI



*Foi desprezada a energia associada ao sistema de refrigeração do MCI

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 31: Diagrama de Sankey para a gaseificação a plasma associado ao CTG



Fonte: Elaborado pelo autor

6.2.3 Resultados da análise exergética

A análise energética apresenta resultados da exergia dos pontos que serão necessários para determinar a eficiência de Segunda Lei e de Bosnakovic e a irreversibilidade de cada equipamento.

As tabela 29 apresenta as exergias do sistema gaseificação a plasma de RSS associado ao motor de combustão interna e conjunto turbina a gás.

Tabela 29 – Exergias da configuração 1 e 2

Exergia [kW]		
Ponto	Configuração 1	Configuração 2
1	27368,56	27368,56
2	-	-
3	-	-
4	13405,97	13405,97
5	13059,65	12892,72
e	0,00	0,00
s	69,50	107,33
6	13059,65	12892,72
7	0	13805,00
8	1900,68	0,00
9	-	1798,87
10	-	13565,55
11	-	9401,63

Fonte: Elaborado pelo autor

Para os cálculos das eficiências exergéticas, a potência do compressor de ar e a gás são de 1954,2 e 1126,9 kW, respectivamente. As tabelas 30 e 31 apresentam a eficiência de Segunda e Lei e de Bosnakovic de cada equipamento para as configurações 1 e 2, respectivamente.

Tabela 30 – Eficiências exergeticas – Configuração 1

Equipamento	Eficiência de Segunda Lei (ϵ) [%]	Eficiência de Bosnakovic (ψ) [%]
Gaseificador	38,47	38,47
Trocador de calor	96,89	97,93
Motor de combustão interna	24,84	35,78

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 31 – Eficiências exergeticas – Configuração 2

Equipamento	Eficiência de Segunda Lei (ϵ) [%]	Eficiência de Bosnakovic (ψ) [%]
Gaseificador	38,47	38,47
Trocador de calor	95,37	96,97
Compressor de gás	80,95	96,52
Compressor de ar	92,05	92,05
Câmara de Combustão	85,23	86,93
Turbina a gás	89,86 (*27,58)	96,88(*27,58)

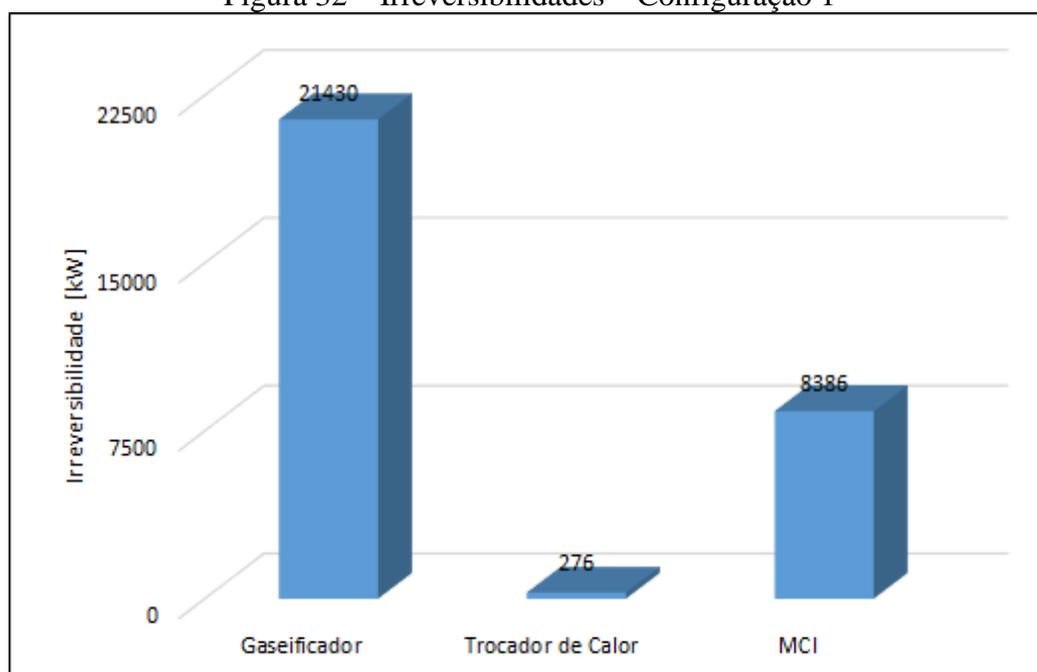
*Eficiência desprezando a exergia dos gases de exaustão

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através das tabelas 29 e 30 é possível observar que os equipamentos que tem processos de combustão são os que apresentam as menores eficiências, sendo o gaseificador e MCI para a configuração 1, e gaseificados e câmara de combustão para a configuração 2.

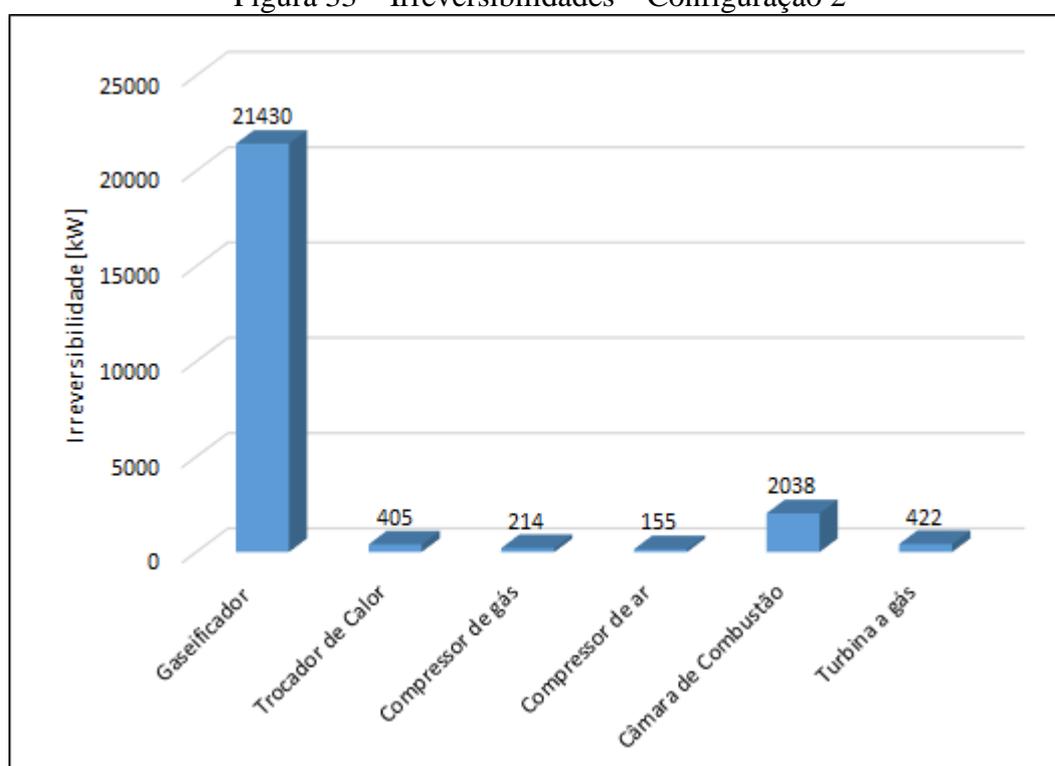
As figuras 32 e 33 apresentam as irreversibilidades de cada equipamento para configuração 1 e 2, respectivamente.

Figura 32 – Irreversibilidades – Configuração 1



Fonte: Elaborado pelo autor

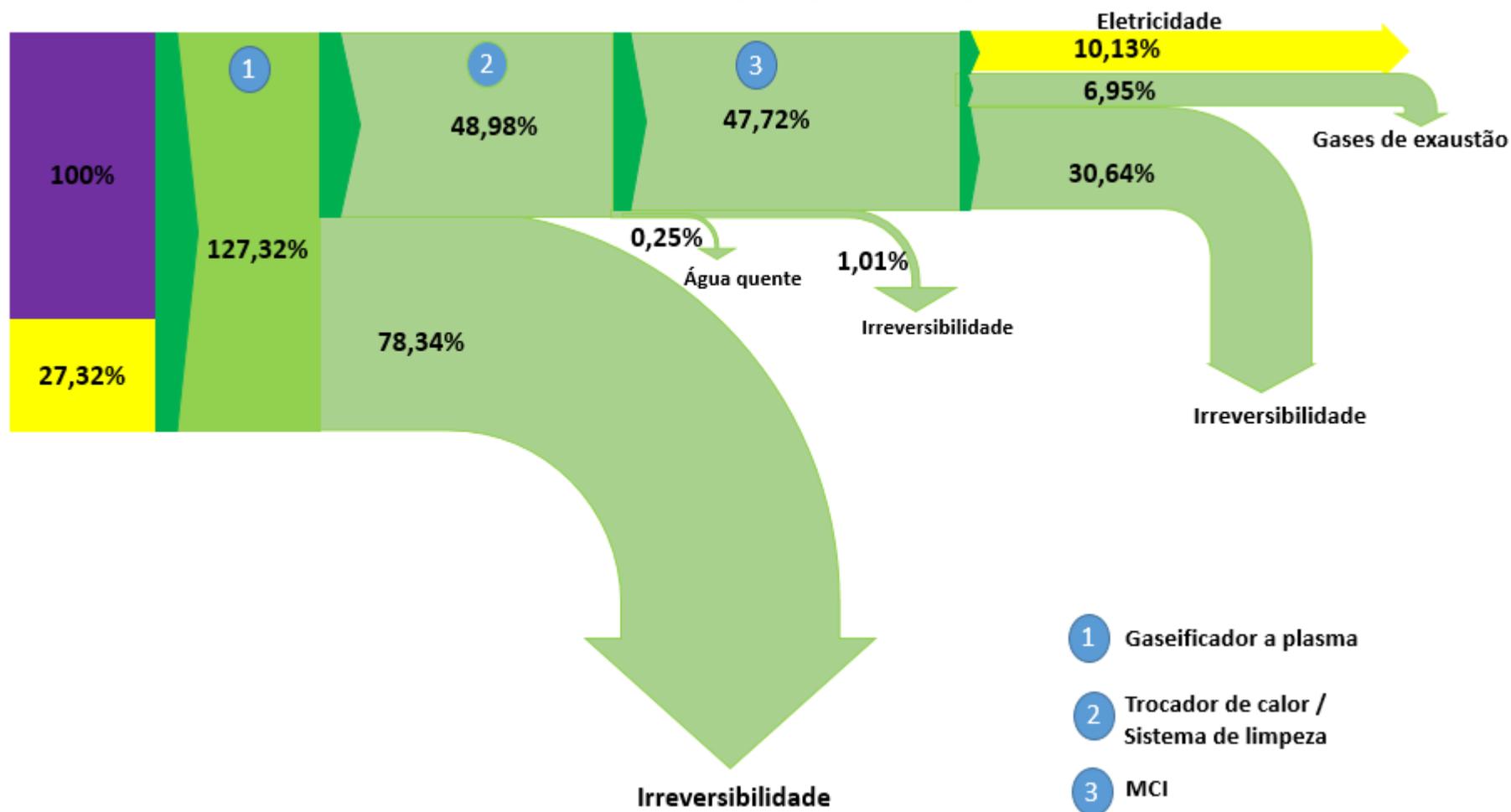
Figura 33 – Irreversibilidades – Configuração 2



Fonte: Elaborado pelo autor

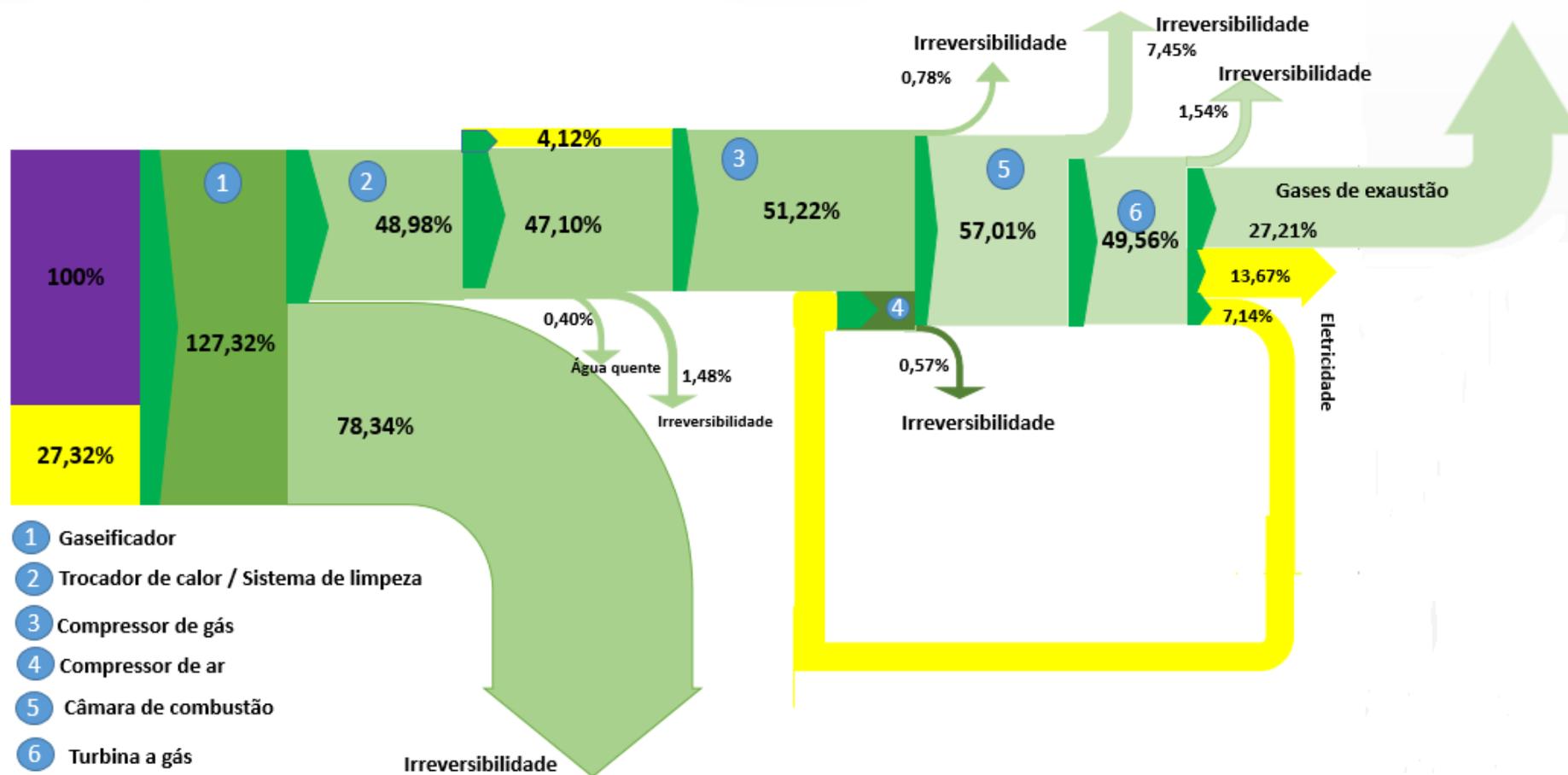
As figuras 32 e 33 mostram que a maior quantidade de irreversibilidade ocorre no gaseificador a plasma, equipamento que possui a maior destruição de exergia, causado principalmente pelas reações químicas que não podem ser reversíveis e pela baixa eficiência de conversão de RSS e eletricidade em gás. E o motor de combustão interna e câmara de combustão vem em seguida como um dos equipamentos que apresentam maiores irreversibilidades para configuração 1 e 2, respectivamente, devido as reações de combustão também não serem reversíveis, sendo impossível produzir gás (gás de síntese) a partir dos gases de exaustão e calor. Considerando a soma das irreversibilidades de cada configuração, a Conf. 1 resultou em 30092 kW e a Conf. 2 em 24664 kW. A configuração 2 mostrou-se com a menor irreversibilidade total, devido ser a configuração que tem as maiores eficiências. A seguir é apresentado o diagrama de Grassmann que apresentam todas estas considerações.

Figura 34 – Diagrama de Grassmann para a gaseificação a plasma associado ao MCI



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 35 – Diagrama de Grassmann para a gaseificação a plasma associado ao CTG



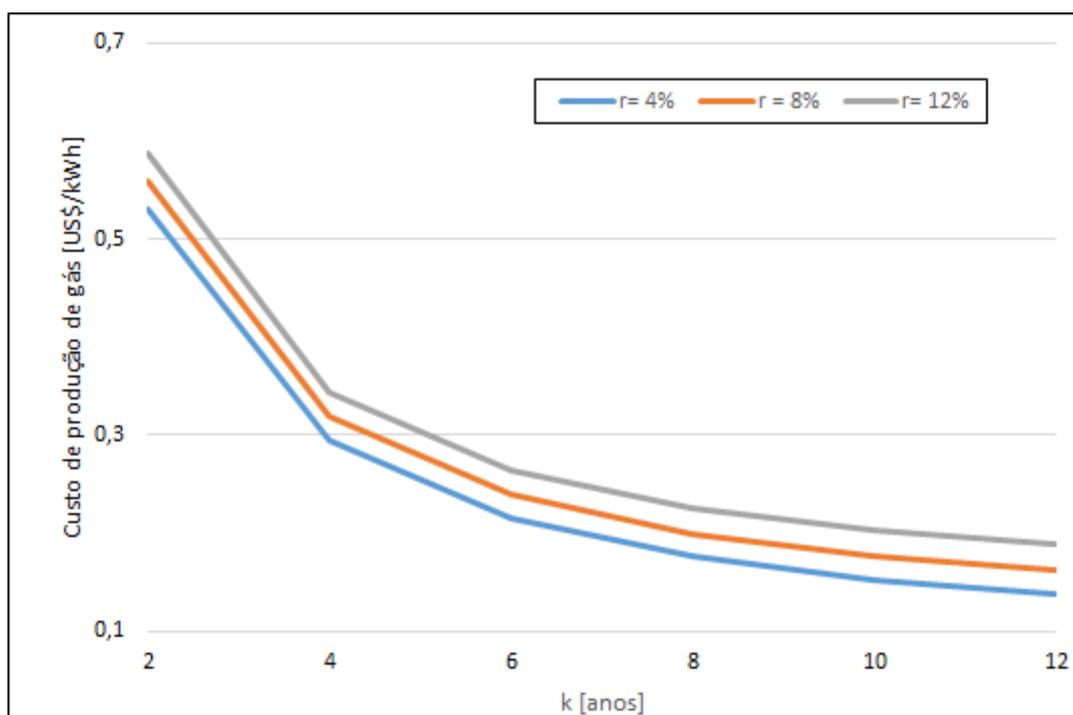
Fonte: Elaborado pelo autor

6.3 RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA

Para a análise econômica é considerado: a taxa anual de juros de 4, 8 e 12%; o período equivalente de utilização do sistema de 4000 h/ano; o período de amortização de capital investido, payback, na faixa de 2 – 12 anos; a taxa de câmbio de US\$1,00 = R\$5,05 (ECONOMIA UOL, 2021); a tarifa de eletricidade para a cidade de São Paulo de US\$0,077 (média entre o horário de pico e fora do horário de pico) (ENEL, 2021); o preço de venda de eletricidade gerada a partir de resíduos de 0,047 US\$/kWh (NASCIMENTO, 2017); o processamento de RSS, dos grandes geradores da cidade de São Paulo, de 36872 toneladas.

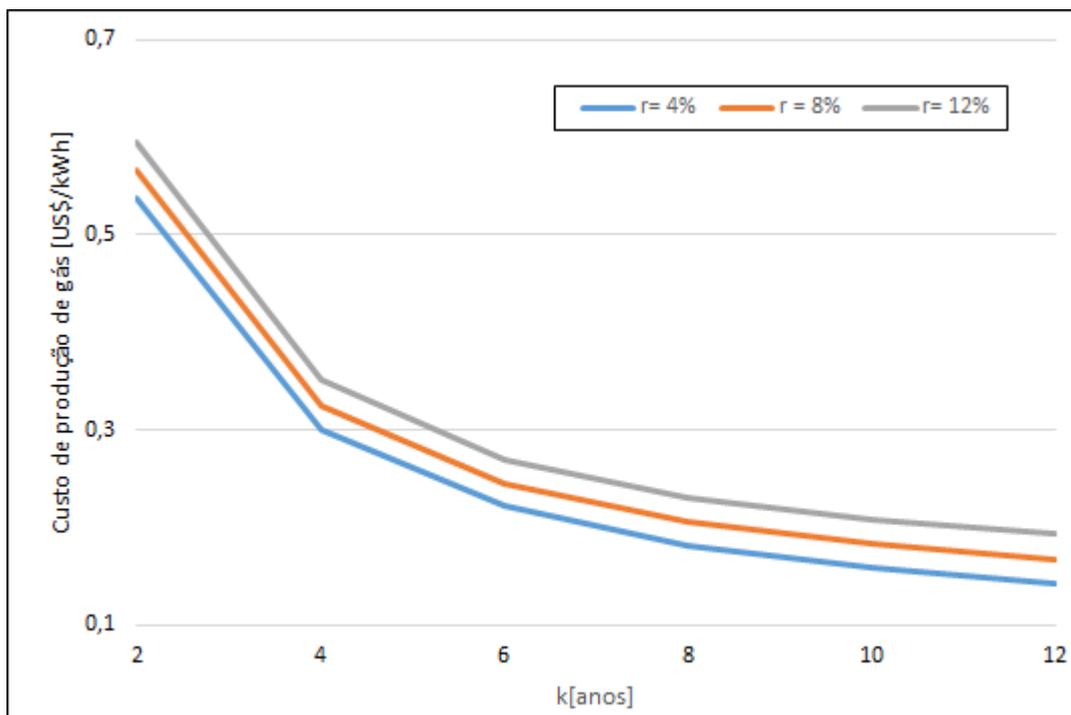
A figura 36 e 37 apresentam o custo de produção de gás (syngas) em função do payback para a configuração 1 e 2, respectivamente. E para comparar as duas configurações, a figura 26 apresenta o custo de produção de gás para a taxa anual de juros de 8%.

Figura 36 – Custo de produção de gás – Conf. 1



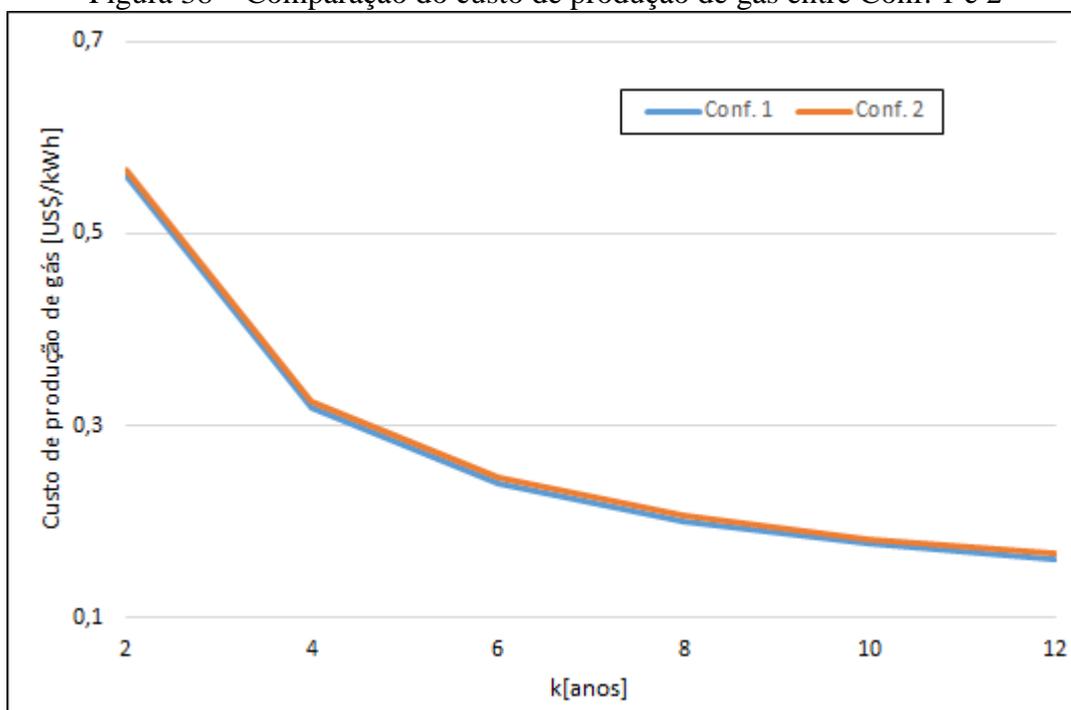
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 37 – Custo de produção de gás – Conf. 2



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 38 – Comparação do custo de produção de gás entre Conf. 1 e 2

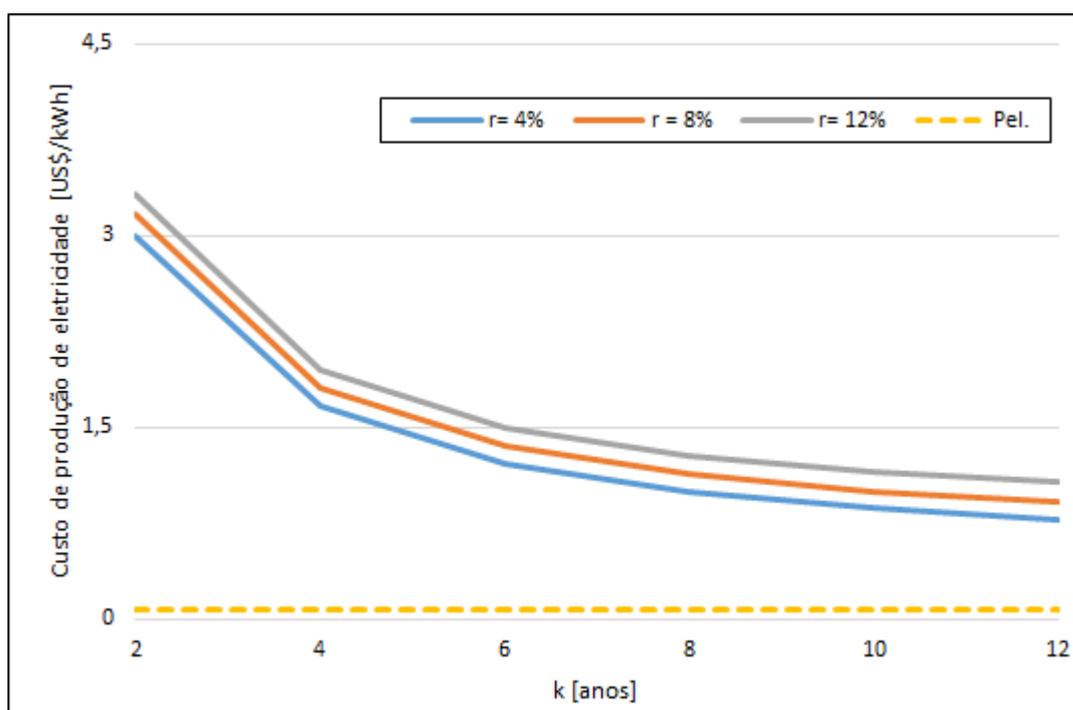


Fonte: Elaborado pelo autor

Através das figuras 36 e 37 é possível observar que o custo de produção de gás diminui com aumento do payback e aumenta conforme aumento da taxa anual de juros. Para configuração 1, o custo de produção de gás varia de 0,13 - 0,58 US\$/kWh e para a configuração 2 o custo está na faixa de 0,14 - 0,59 US\$/kWh. E através da figura 38, observa-se que o custo de produção de gás para a configuração 1 e 2 são bem próximos, mas para a configuração 2 apresenta os maiores valores. Isso ocorre devido a parcela de investimento da configuração 2 contabilizar o compressor de gás, que não é necessário na config. 1, acarretando em custo de produção de gás mais elevado.

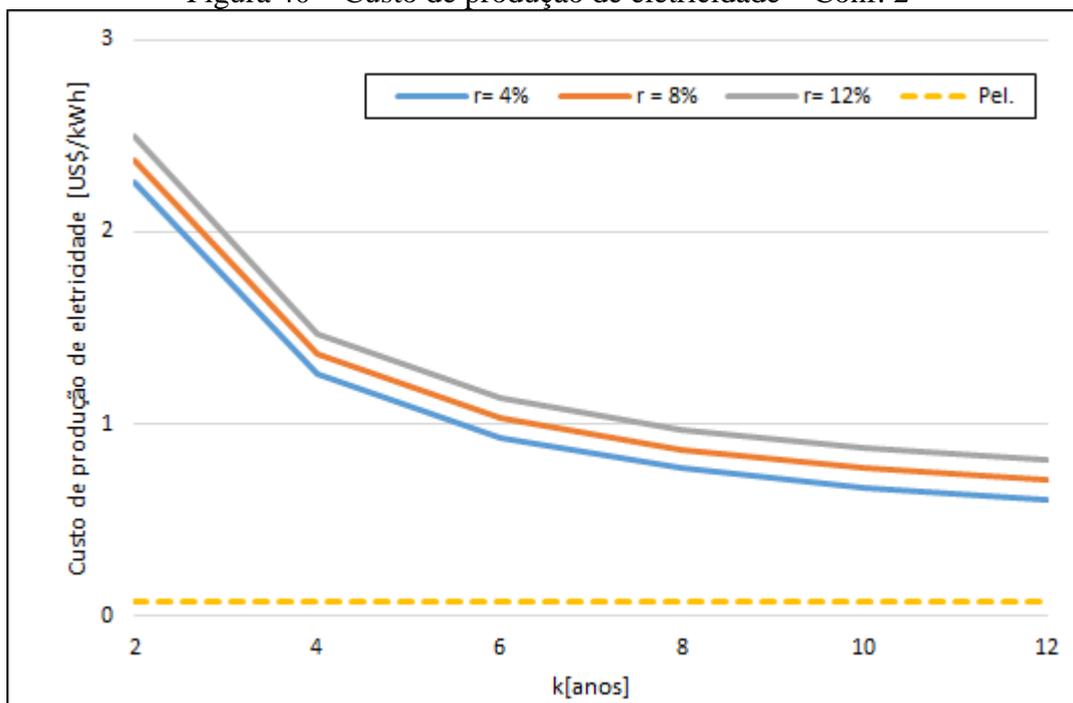
A figura 39 e 40 apresentam o custo de produção de eletricidade para a configuração 1 (MCI) e configuração 2 (TG), e a tarifa de eletricidade para a cidade de São Paulo em função do payback. A comparação das duas configurações é apresentada na figura 41, considerando a taxa anual de juros de 8%.

Figura 39 – Custo de produção de eletricidade – Conf. 1



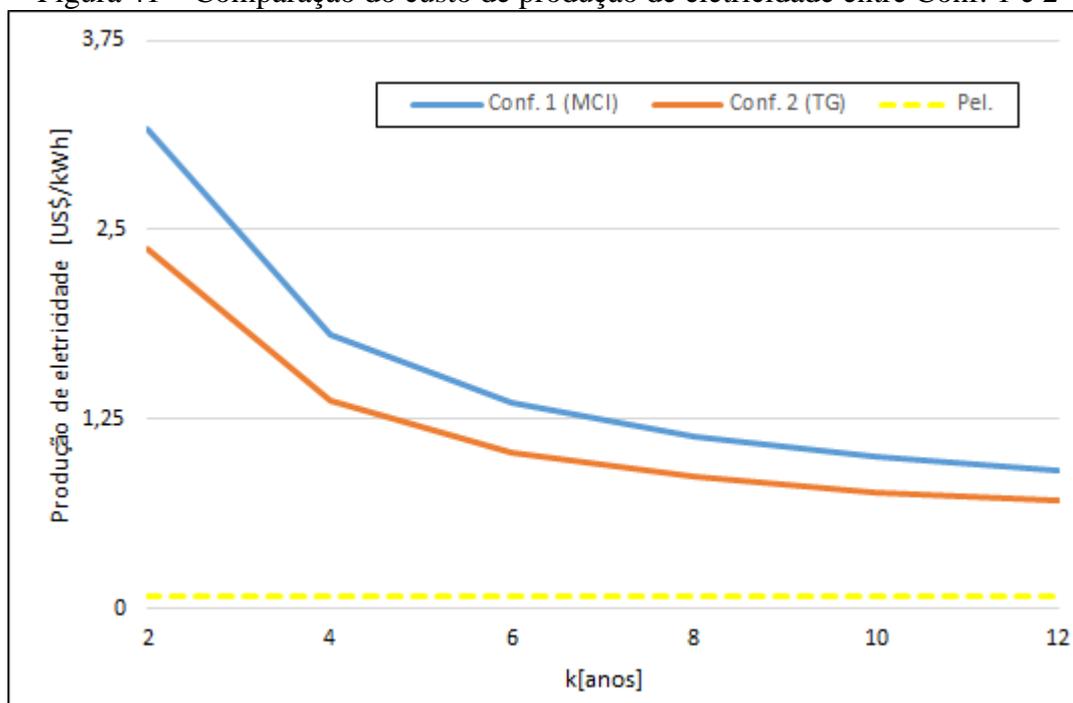
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 40 – Custo de produção de eletricidade – Conf. 2



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 41 – Comparação do custo de produção de eletricidade entre Conf. 1 e 2



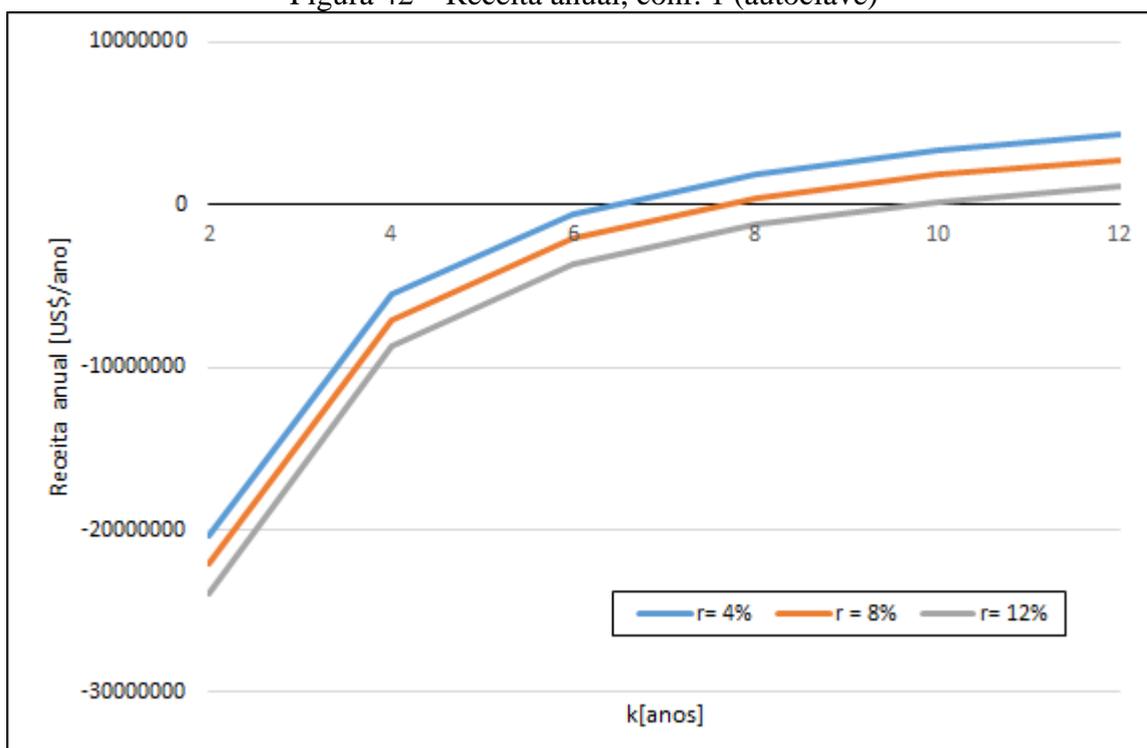
Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se através das figuras 39 e 40 que o custo de produção de eletricidade para ambas as configurações é mais alto do que a tarifa de eletricidade, devido ao elevado custo do gás

utilizado no MCI e CTG. O custo de produção de eletricidade varia 0,77 – 3,32 US\$/kWh e 0,60 – 2,49 US\$/kWh para as configurações 1 e 2, respectivamente. Através da figura 41, observa-se que o custo de produção de eletricidade é menor para a configuração 2, devido ter o menor custo de produção de gás e ainda produzir mais eletricidade do que a configuração 1.

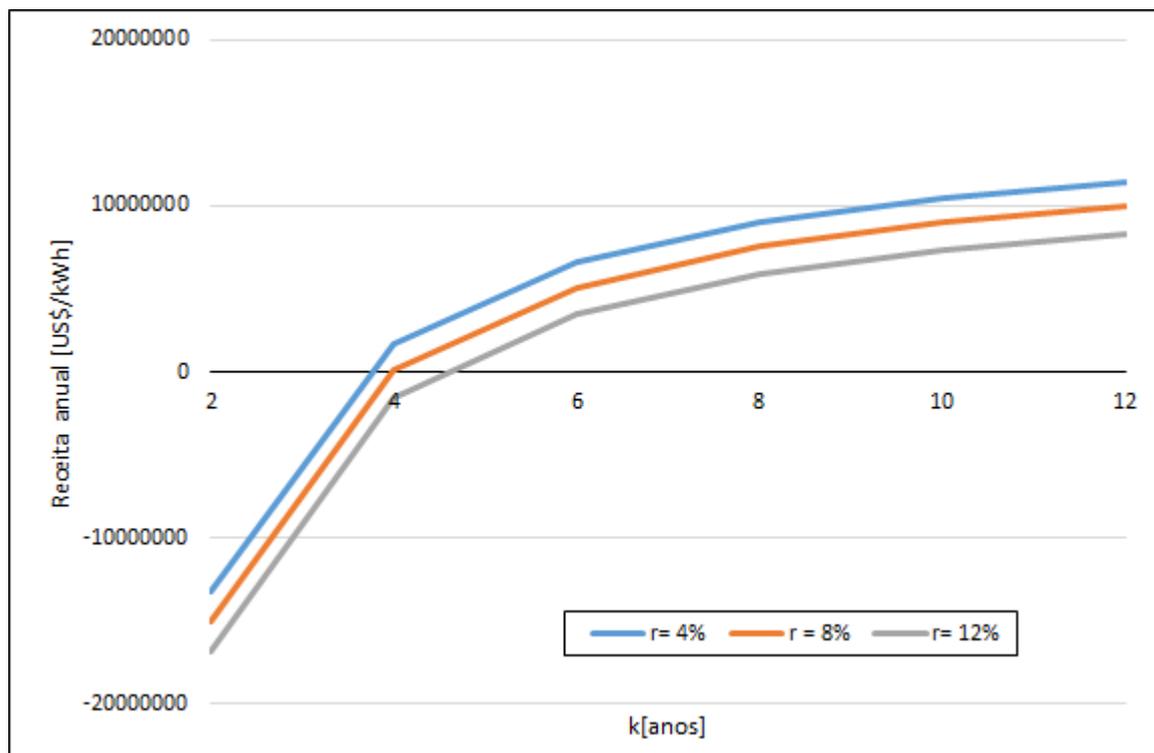
Para os cálculos da receita anual é considerado o processo de autoclavagem para o descarte de RSS utilizado na cidade de São Paulo, e também é considerado o processo de incineração, o mais utilizado no Brasil, para fins comparativos. As figuras 42, 43, 44 e 45 apresentam a receita anual em função do payback para a configuração 1 (autoclave e incineração) e configuração 2 (autoclave e incineração), respectivamente. E para comparar as configuração e processos foi elaborada a figura 46. As curvas de receita mostram os respectivos payback para cada configuração considerando que o processo de autoclave ou incineração seja substituído pelo processo de gaseificação a plasma.

Figura 42 – Receita anual, conf. 1 (autoclave)



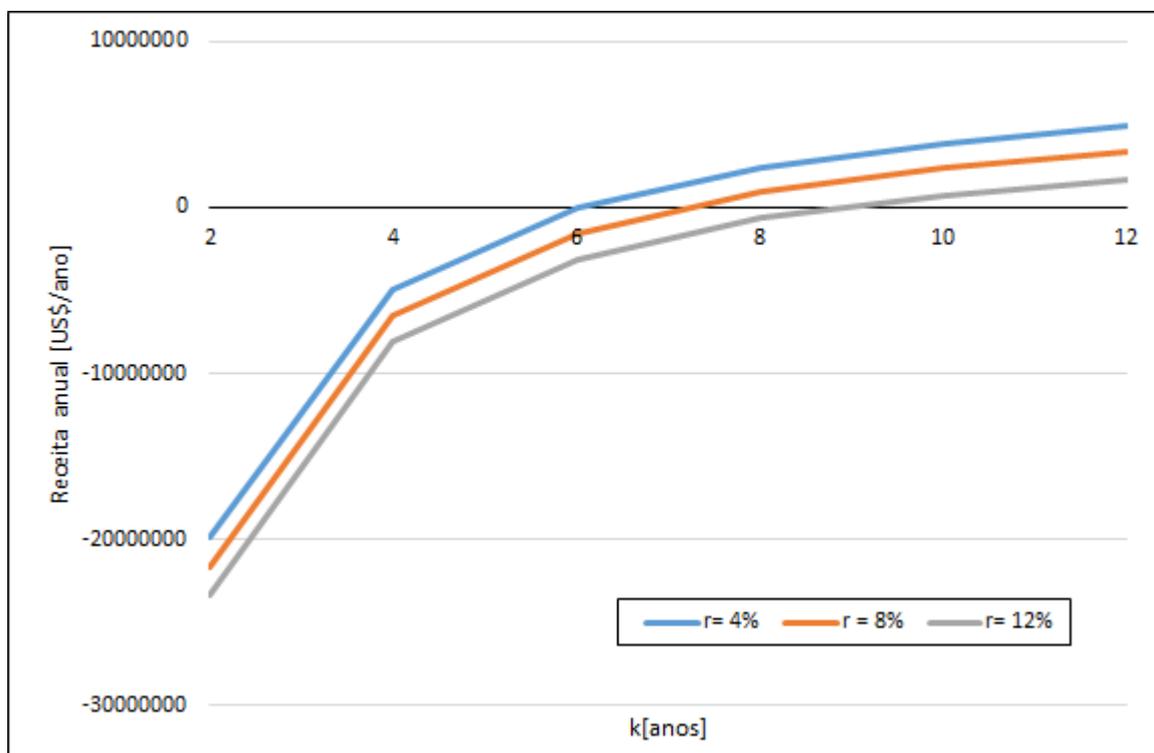
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 43 – Receita anual, conf. 1 (incineração)



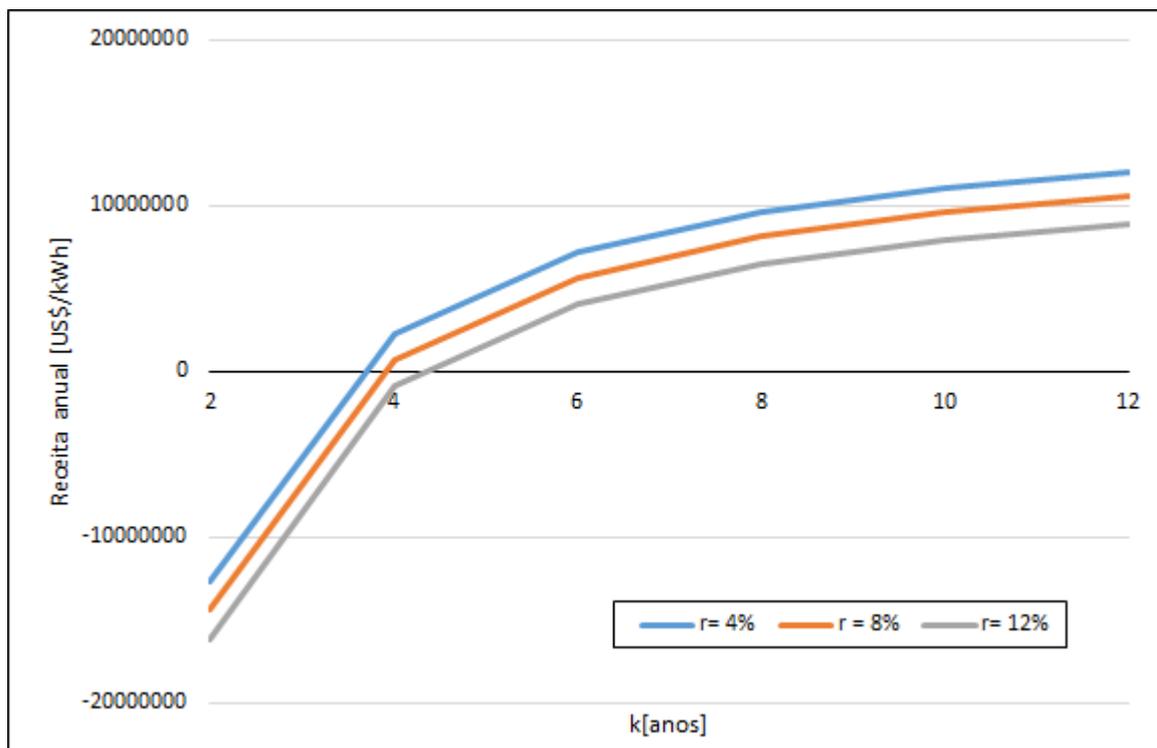
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 44 – Receita anual, conf. 2 (autoclave)



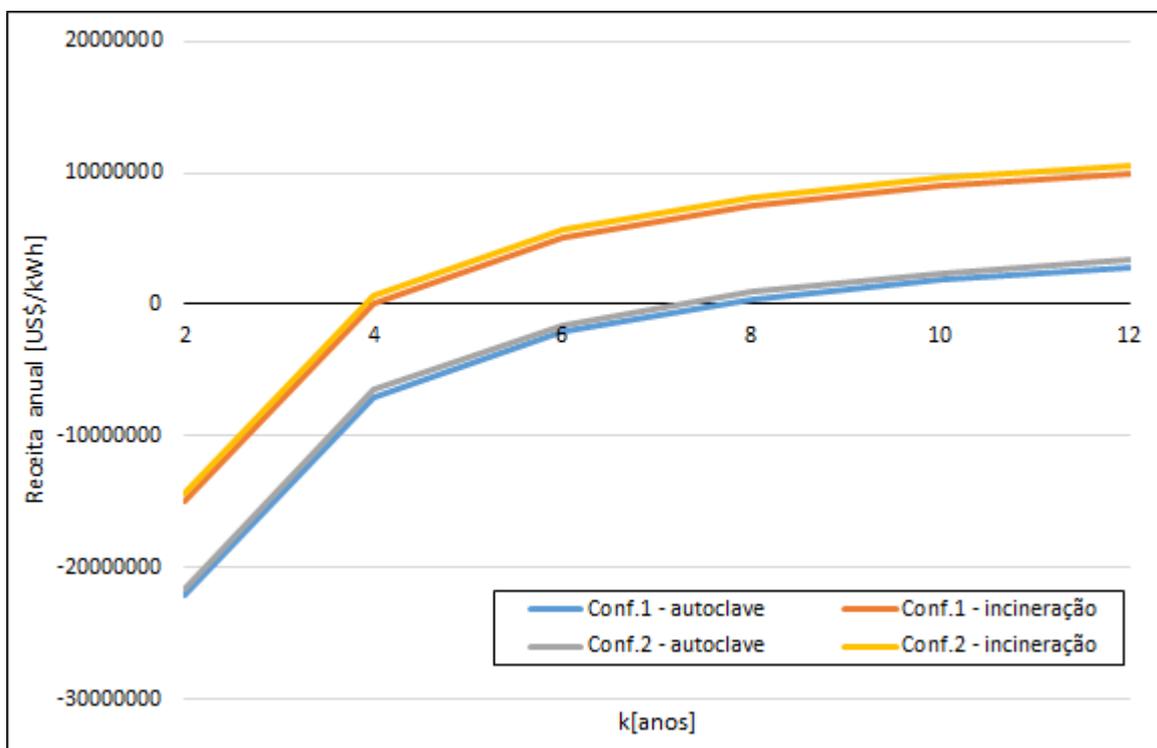
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 45 – Receita anual, conf. 2 (incineração)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 46 – Receita anual, comparação entre conf. 1 e 2, considerando autoclave e incineração



Fonte: Elaborado pelo autor

Através das figuras que apresentam a receita anual é possível observar que o payback quando considera o processo de autoclavagem para o descarte de RSS está na faixa de 7 - 10 anos e 6 – 9 anos para as configurações 1 e 2, respectivamente. E quando considera o processo de incineração, o payback está na faixa de 3 – 5 anos para ambas as configurações. E na última figura é possível observar que o payback para as duas configurações são bem próximos, mas a configuração 2 ainda se mostra como mais vantajosa, devido produzir mais eletricidade do que a configuração 1. E ainda, quando se considera o processo de incineração o payback é mais baixo, devido o alto custo cobrado pelo descarte através desta tecnologia. Desta forma, ainda que o processo de gaseificação a plasma tenha um alto consumo de eletricidade, esta tecnologia já apresenta viabilidade econômica, principalmente para as localidades que utilizam o processo de incineração.

7 CONCLUSÕES

A tecnologia da gaseificação a plasma ainda está em desenvolvimento, mas já se apresenta como uma rota alternativa para o tratamento de RSS, principalmente na era pandêmica que apresentou significativo aumento na produção deste tipo de resíduo.

Através da metodologia de dimensionamento foi possível determinar o melhor ponto de operação que corresponde ao $\alpha_{máx.} = 2,25$ e temperatura de 1040 K, nessas condições a composição em massa do syngas é de 5,35% de H_2 , 63,65% de CO, com o PCI de 13754 kJ/kg. Diante desses dados é possível obter as principais dimensões do gaseificador a plasma para o processamento de 0,289 kg/s de RSS (25 TPD); assim o diâmetro de entrada de RSS, e da saída de cinzas e gás(syngas) apresentam valores de 410, 30 e 200 mm, respectivamente; a altura e a diâmetro interna do gaseificador são de 2617 e 1300 mm, respectivamente; a espessura do material isolante é de 602 mm; e a altura e diâmetro total são de 3827 e 2510 mm, respectivamente. Para a cidade de São Paulo são necessários 4 gaseificadores a plasma de 25 TPD.

A análise energética proporcionou obter as propriedades necessárias em cada ponto e assim determinar que o gaseificador a plasma requer 7476,51 kW de eletricidade para a sua operação e o sistema gaseificador a plasma associado ao MCI tem eficiência energética de 49,33%; quando associado a MCI e a CTG tem o potencial de produzir 2772,54 e 3741,63 kW, respectivamente, suprimindo 37,1 e 50,1% da necessidade potência elétrica total requerida nas tochas, respectivamente.

Através da análise exergética o motor de combustão interna e o gaseificador a plasma mostram-se como equipamentos que tem as maiores destruições de exergia, com eficiência exergética de 24,84% e 38,47%, respectivamente. Desta forma, é evidente que tecnicamente o sistema de gaseificação a plasma necessita de melhorias tecnológicas pelo fato de apresentar elevado consumo de energia e ainda apresentar muitas perdas concentradas no gaseificador; sobre o ponto de vista exergético (e também constatado pela análise energética), a melhor opção de escolha é a conf. 2 (utilizando CTG) que apresenta maior produção de eletricidade.

A análise econômica mostra que o custo de produção de gás (syngas) se situa na faixa de 0,13 – 0,59 US\$/kWh, apresentando custo de produção de eletricidade entre 0,77 – 3,22 US\$/kWh e entre 0,60 – 2,49 US\$/kWh, para o MCI e CTG, respectivamente; esses valores são bem superiores a tarifa de eletricidade da cidade de São Paulo (0,077 US\$/kWh). Mas, quando se analisa o payback, a tecnologia de gaseificação a plasma (vida útil de 25 a 30 anos) mostra-se promissora com payback de 7 – 10 e 6 – 9 anos para conf. 1 (MCI) e conf. 2 (CTG),

respectivamente, quando comparado com o processo de autoclavagem e de 3 – 5 anos para ambas as configurações quando considerado o processo de incineração. Assim a configuração 2 mostra-se mais atrativa economicamente do que a configuração 1, com menores custos e menores valores de payback.

Finalmente é possível apontar que apesar da tecnologia de gaseificação a plasma não se mostrar atrativa tecnicamente sobre o ponto de vista de auto-suficiência elétrica (quando associada a MCI ou ao CTG), essa mostra-se promissora economicamente e ambientalmente correta e como boa alternativa para o processamento de RSS (quando comparada com os atuais processos utilizados: autoclave e incineração), pois permite aproveitamento energético do resíduo e redução consideravelmente da poluição do meio ambiente. Assim a gaseificação a plasma torna-se uma opção para substituir os processos de incineração e autoclavagem, processos esses mais utilizados no Brasil, e ainda pode incentivar as cidades que não fazem coleta ou que descartam o RSS em lugares inadequados a iniciarem o tratamento adequado desses resíduos.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise ambiental do processo de gaseificação a plasma de RSS;
- Estudos de engenharia econômica considerando custo zero de produção de gás de síntese e também considerando o custo ambiental da eliminação das emissões de CO₂ equivalente;
- Estudos para o processamento de outros tipos de resíduos, como resíduos sólidos urbanos, pneus e EPS (isopor);
- Estudos termoeconômicos (energo e exergo) do processo da gaseificação a plasma do RSS;
- Estudo energo e exergo-ambiental do processo da gaseificação a plasma do RSS;
- Entre outros.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9191/7500**: Sacos plásticos para acondicionamento de lixo - Requisitos e métodos de ensaio. apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=709>. Acesso em 02 abr. 2021.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2018-2019, 158 p.
- ALIBABA. 2021. Disponível em: https://www.alibaba.com/product-detail/Price-CycloneSeparatorLowPriceHigh_60823929263.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.c9c3773aIMzgWQ&s=p. Acesso em 01 jun 2021.
- BOEHM, F. R. **Desing analysis of thermal systems**. Editora John Weley & Sons, USA, 173p., (1987).
- BORGNAKKE, C.; SONNATAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica**. São Paulo, Blucher, 2013.
- BRASIL. **Lei de nº 12.305**: Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Brasília: Presidência da República. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 27 ago. 2018.
- BRIZI, F.; SILVEIRA, J. L.; DESIDERI, U.; REIS, J. A.; TUNA, C. E.; LAMAS, W. Q. Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: Comparison between natural gas and biogas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v.38, p.193-211, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.088>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114004225?casa_token=Q97CxVTJZkoAAAAA:3O42geLQAkoszSIwyK4af_BM6gMVUgD2HSyHXxbqEl4P5bEfcIX_u8GXJmEMIxHNYukp21rr. Acesso em: 18 abr. 2018.
- BYUN, Y.; CHO, M; HWANG, S; CHUNG, J. Thermal Plasma Gasification of Municipal Solid Waste (MSW). **Gasification for Practical Applications**. London: IntechOpen, 2012. p.183 -210. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/48537>. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/40402>. Acesso em: 16 ago. 2017.
- BYUN, Y.; WON NAMKUNG, W.; CHO, M.; CHUNG, J. W.; KIM, Y. S.; LEE, J. H.; LEE, C. R.; HWANG, S-M. Demonstration of Thermal Plasma Gasification/Vitrification for Municipal Solid Waste Treatment Environ. **Environmental Science & Technology**, Washington: ACS Publications, v.44, p.6680-6684, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1021/es101244u>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20677789/>. Acesso em: 25 set. 2018.
- Cai, X.; DU C. Thermal Plasma Treatment of Medical Waste. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, Springer, New York, v. 41, p.1–46. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11090-020-10119-6>. Acesso em: 14 out. 2021.

CAFURE, V.A; PATRIARCHA-GRACIOLI, S.R. Os resíduos de serviço de saúde e seus impactos ambientais: uma revisão bibliográfica. Campo Grande: **Interações**, v.16, n. 2, p. 301-314, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/151870122015206>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/inter/a/CjwFxcQcPrxcn9BYTNwFQvJ/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 3 mar. 2018.

CARPINLIOGLU, M. O.; SANLISOY A. Performance assessment of plasma gasification for waste to energy conversion: A methodology for thermodynamic analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, Amsterdã, v. 43, n. 25, p.11493-11504, 2018. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.147>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319917334195>. Acesso em: 12 nov. 2020.

CATERPILLAR. 2020. Disponível em: <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/LEXE0422-04>. Acesso em: 30 out. 2020.

CETESB. 2020. Disponível em: <https://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/2007/10/saobernardo.pdf> 2020. Acesso em: 10 jun 2020.

CHU, J. P.; HWANG, I. J.; TZENGBY, C. C.; KUO, Y. Y.; YU, Y. J. Characterization of vitrified slag from mixed medical waste surrogates treated by a thermal plasma system. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdã, v. 58, n.1–3, p. 179-194, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(97\)00130-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(97)00130-1). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319917334195>. Acesso em: 12 nov. 2020.

CORONADO, C. J. R. **Análise Termoeconômica da Produção de Biodiesel**: aspectos técnicos, econômicos e ecológicos. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/106406>. Acesso em: 15 jun. 2019.

CORONADO, C.R.; CARVALHO, JR.; YOSHIOKA, J.T.; SILVEIRA, J.L. Determination of ecological efficiency in internal combustion engines: The use of biodiesel. **Applied Thermal Engineering**, Amsterdã, v.29, p.1887–1892, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.10.012>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431108004316?casa_token=mKPFXQzBc8IAAAAAA:NnnFTtBLzRCHkpi-90WH_7rTSGJ045NpuEAEm-7banswhssTNkN4KKV5ADP4-e5TB-IR0byT. Acesso em: 10 set. 2019.

DILAWARI, A. H.; SZEKELY J. A mathematical model of slag and metal flow in the ESR Process. **Metallurgical Transactions**, London, v.8, p.227–236, 1977. <https://doi.org/10.1007/BF02657651>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02657651>. Acesso em: 25 set. 2018.

DINCER, I; HUSSAIN, M. M; AL-ZAHARMAH I. Energy and exergy utilization in transportation sector of Saud Arabia. **Applied Thermal Engineering**, Amsterdã, v.24, p.524-538, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.10.011>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431103003235?casa_token=KMGqK

xqsuwwAAAAA:1NEDaoHNExWMBju1JSULXqU_voHOoIh3_LN2OtyiJdEtjaiN-hGXXKAKUgUMRXMu_9-dFpXWp. Acesso em: 30 nov. 2018.

DUARTE, I. C.; GHIZZI L, C.; SANTANA, R. A.; DAVIES Y. M. **Gestão de resíduos sólidos de serviços de saúde na região da grande vitória**. 2014. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Produção) Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014. Disponível em: <https://marcaambiental.com.br/wp-content/uploads/2018/10/30f31684bb0d9ccfbb088f95f5f9b3a6.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2019.

DUCHARME, C.; THEMELIS N. Analysis of thermal plasma – assisted waste-to energy processes. **Proceedings of the 18th Annual North American Waste-to-Energy Conference NAWTEC18**, Orlando, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/260388338_Analysis_of_Thermal_Plasma-Assisted_Waste-to-Energy_Processes. Acesso em: 1 abr. 2019.

ERDOGAN, A. A.; YILMAZOGLU, M. Z. Plasma gasification of the medical waste. **International Journal of Hydrogen Energy**, Amsterdã, n.57, v.46, p. 29108-29125, 2021. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.069>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920346048?via%3Dihub>. Acesso em: 24 out. 2021.

ENEEL. 2021. Disponível em:https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Corporativo_e_Governo/tabela-de-tarifas.html#. Acesso em: 02 jun. 2021.

EL-SALAM M. M. Hospital waste management in El-Beheira Governorate, Egypt. **Journal of Environmental Management**, Amsterdã, v. 91, n 3, p. 618-629, 2010. DOI:10.1016/j.jenvman.2009.08.012. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19931245/>. Acesso em: 14 set. 2018.

FEITAL. 2021. Disponível em: https://www.feital.com.br/wp-content/uploads/2016/01/caracteristica_aco_inoxidavel.pdf. Acesso em: 25 jun. 2021.

GIMBUN, J.; CHOONG, T. S. Y.; FAKHRU’L-RAZI, A.; CHUAH T. G. Prediction of the effect of dimension, particle density, temperature, and inlet velocity on cyclone collection efficiency. **Jurnal Teknologi**, Malaysia, v.40, p.37-50, 2004. DOI: 10.11113/jt.v40.421. Disponível em: <https://journals.utm.my/jurnalteknologi/article/view/421>. Acesso em: 20 nov. 2020.

GIL T. N. L. **Qualitative and quantitative characterization of health service waste generated at the Irmandade Santa Casa de Misericórdia de São Carlos, SP**. 2007. São Carlos School of Engineering, University of Saõ Paulo (USP), 2007. Disponível em: http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180300/tce-13072010-095537/publico/Gil_Tatiana_Novis_Lopes.pdf. Acesso em: 10 ago. 2019.

GOROKHOVSKI, M.; KARPENKO, E. I.; LOCKWOOD, F. C.; MESSERLE, V. E.; TRUSOV, B. G.; USTIMENKO, A. B. Plasma technologies for solid fuels: experiment and theory. **Journal of the Energy Institute**, United Kingdom, v.78, n.4, p.157-171, 2005. DOI:10.1179/174602205X68261. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/174602205X68261>. Acesso em: 15 ago. 2018.

GUPTA, S.; BOOJH, R.; MISHRA, A.; CHANDRA H. Rules and management of biomedical waste at Vivekananda Polyclinic: A case study. **Waste Management**, Amsterdã, v.29, n. 2, p.812-819, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X08001840?via%3Dihub>. Acesso em: 23 set. 2019.

HANDBOOK GAS TURBINE WORLD. 2012. **Gas turbine world handbook**. Fairfield: Pequot Publication Inc., 2011. 212 p.

HRABOVSKY, M.; VAN DER WALT, I.J. Plasma Waste Destruction. **Springer International Publishing**, AG 2017 F.A. Kulacki, Handbook of Thermal Science and Engineering. Disponível em: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-32003-8_32-1.pdf. Acesso em: 27 ago. 2019.

IBAM. 2021. Disponível em: http://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/cartilha_limpeza_urb.pdf. Acesso em: 02 jun. 2021.

IBRAHIMOGLU, B.; CUCEN, A.; YILMAZOGLU M. Z. Numerical modeling of a downdraft plasma gasification reactor. **International Journal of Hydrogen Energy**, Amsterdã, v. 42, n.4, p.2583-2591, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.224>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X08001840?via%3Dihub>. Acesso em: 30 out. 2020.

IBSEN K. **Equipment design and cost estimation for small modular biomass systems, synthesis gas cleanup, and oxygen separation equipment**. A national laboratory of the U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39945.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2021.

IBGE. 2021. Disponível em: www.ibge.gov.br . Acesso em: 10 jan. 2021.

INDRAWAN, N.; MOHAMMAD, S.; KUMAR, A.R.L.; HUHNEKE R. L. Modeling low temperature plasma gasification of municipal solid waste. **Environmental Technology & Innovation**, Amsterdã, v. 15, p.100412, 2019. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100412>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352186419300331>. Acesso em: 30 out. 2020.

INCROPERA, F.P.; BERGMAN, T.L.; DEWITT, D.P. (2008), **Fundamentos de transferência de calor e de massa**, 6ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro-RJ, 643p.

JANAJREH, I.; SHABBARRAZA, S. S.; VALMUNDSSON A. S. Plasma gasification process: Modeling, simulation and comparison with conventional air gasification. **Energy Conversion and Management**, Amsterdã v. 65, p.801-809, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.03.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890412001549?via%3Dihub>. Acesso em: 23 set. 2020.

KIM, B.; SONG, J.; KIM, J. Y.; HWANG, J.; PARK D. Study on nanoparticle production process characteristics in transferred arc plasma system using heat and mass balance.

Advanced Powder Technology, v. 29, n.12, p. 3192-3198, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.08.022>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921883118304357?via%3Dihub>. Acesso em: 23 set. 2020.

KINDI G. Y. AL. Evaluation of the Reality of the Management and Treatment of Solid Waste in Al-Yarmouk Teaching Hospital. **International Journal of Engineering & Technology**, Jordan v.7 p. 594-600, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.08.022>. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Ghayda-Al-Kindi/publication/331135251_Evaluation_of_the_Reality_of_the_Management_and_Treatment_of_Solid_Waste_in_Al-Yarmouk_Teaching_Hospital/links/5c671bd992851c1c9de45137/Evaluation-of-the-Reality-of-the-Management-and-Treatment-of-Solid-Waste-in-Al-Yarmouk-Teaching-Hospital.pdf. Acesso em: 27 jan. 2020.

KOTAS. T.J. **The thermal method of thermal plants**. Krieguer Publishing Company, edição original em 1985, reimprimido em 1995. Florida, USA.

KUNTE, B. **Thermodynamic, economic and emissions analysis of a micro gas turbine cogeneration system operating on biofuels**. 2015. 101 p. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) - Faculty of Engineering of Guaratinguetá, São Paulo State University, Guaratinguetá, 2015. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/132393/kunte_b_me_ilha.pdf;sequence=3. Acesso em: 18 jun. 2020.

LAPUERTA, M.; HERNÁNDEZ, J.J.; PAZO, A.; LÓPEZ J. Gasification and co-gasification of biomass wastes: effect of the biomass origin and the gasifier operating conditions. **Fuel Processing Technology**, Amsterdã, v. 89, p. 828-837, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.02.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382008000404?via%3Dihub>. Acesso em: 23 set. 2020.

Lei 12305. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. 2018. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/vigilancia-agropecuaria/ivegetal/bebidas-arquivos/lei-no-12-305-de-02-de-agosto-de-2010.pdf/view>. Acesso em: 04 set. 2018.

LUFTECH. 2021. Disponível em: <http://luftech.com.br/servico-de-incineracao-como-negocio/>. Acesso em: 04 jul. 2021.

MANUAL RSS- Manual do Resíduos Sólidos do Serviço de Saúde. 2018. Disponível em: http://bvsm.saude.gov.br/bvs/publicacoes/Manual_RSS_Parte3.pdf. Acesso em: 08 nov. 2018.

MATERAZZI, M.; TAYLOR, R.; CHAPMAN, C. Performance analysis of RDF gasification in a two stage fluidized bed-plasma process. **Waste Management**, Amsterdã, v.47 (Part B), p.256-266, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.016>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382008000404?via%3Dihub>. Acesso em: 10 maio 2019.

MAYA, D. M. Y.; SARMIENTO, A. L. E.; OLIVEIRA, C. A. B.; DE S.; LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V. J. Gasification of Municipal Solid Waste for Power Generation in Brazil, a Review of Available Technologies and Their Environmental Benefits. **Journal of Chemistry and Chemical Engineering**, London, v.10, p.249-255, 2016. Doi: 10.17265/1934-7375/2016.06.001. Disponível

em:https://www.researchgate.net/publication/311989817_Gasification_of_Municipal_Solid_Waste_for_Power_Generation_in_Brazil_a_Review_of_Available_Technologies_and_Their_Environmental_Benefits. Acesso em: 15 abr. 2019.

MESSERLE, V. E.; MOSSE, A. L.; USTIMENKO, A.B. Processing of biomedical waste in plasma gasifier. **Waste Management**, Amsterdã, v. 79, p. 791-799, 2018. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.048>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X18305385?via%3Dihub>. Acesso em: 12 maio 2019.

MINUTILLO, M.; PERNA, A.; DI BONA D. Modelling and performance analysis of an integrated plasma gasification combined cycle (IPGCC) power plant. **Energy Conversion and Management**, Amsterdã, v. 50, n. 11, p. 2837-2842, 2009. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.07.002>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890409002738>. Acesso em: 12 maio 2019.

MMA. 2018. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/_arquivos/lixo_hosp.pdf. Acesso em: 12 set. 2018.

MOUNTOURIS, A.; VOUTSAS, E.; TASSIOS D. Solid waste plasma gasification: Equilibrium model development and exergy analysis. **Energy Conversion and Management**, Amsterdã, v. 47, n.13-14, p.1723-1737, 2006. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.10.015>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890405002694?via%3Dihub>. Acesso em: 5 abr. 2019.

MOUSTAKAS, K.; FATTA, D.; MALAMIS, S.; HARALAMBOUS, K.; LOIZIDOU M. Demonstration plasma gasification/vitrification system for effective hazardous waste treatment. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdã, v. 123, n.1-3, p.120-126, 2005. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.03.038>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389405001585?via%3Dihub>. Acesso em: 10 set. 2019.

MUNIR, M.T; MARDON, I.; AL-ZUHAIR, S.; A. SHAWABKEH, A.; SAQIB N.U. Plasma gasification of municipal solid waste for waste-to-value processing. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 116, p. 109461, 2019. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109461>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119306690?via%3Dihub>. Acesso em: 22 ago. 2021.

NASCIMENTO, K. L. S.; MAIA, S.M. F.; SILVA, S. J. C.; SANTOS E. L. Geração de energia elétrica e viabilidade técnico-econômica de um biodigestor no setor hospitalar. **PUBVET**, Maringá, v.11, n.12, p.1263-1273, 2017. DOI:

<http://dx.doi.org/10.22256/PUBVET.V11N12.1263-1273>. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/321433930_Geracao_de_energia_eletrica_e_viabilidade_tecnico-economica_de_um_biodigestor_no_setor_hospitalar. Acesso em: 8 set. 2020. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12808 ABNT (1993)** - Resíduos de serviços de saúde. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/residuos/files/2014/04/NBR-12808-1993-Res%C3%ADduos-de-servi%C3%A7os-de-sa%C3%BAde.pdf>. Acesso em: 26 set. 2018.

NIDONI P. G. Incineration process for solid waste management and effective utilization of by products. **International Research Journal of Engineering and Technology**, Tamilnadu, v. 4, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.22256/PUBVET.V11N12.1263-1273>. Disponível em: <https://www.irjet.net/archives/V4/i12/IRJET-V4I1270.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2018.

NICODÈME, T.; BERCHEM, T.; JACQUET, N.; RICHEL A. Conversão termoquímica de subprodutos da indústria do açúcar em biocombustíveis. **Revisões de Energia Renovável e Sustentável**, v.88, p.151-159, 2018.

PAULINO, R. F. S.; ESSIPTCHOUKB, A. M.; SILVEIRA J. L. The use of syngas from biomedical waste plasma gasification systems for electricity production in internal combustion: Thermodynamic and economic issues. **Energy**, Amsterdã, v.199, p.117419, 2020. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117419>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544220305260?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jan. 2021.

PAULINO, R. F. S.; SILVEIRA, J. L. **Biohydrogen production and bagasse gasification process in the sugarcane industry**. Sustainable Bioenergy: Advances and Impacts. 1ed.Amsterdam: Elsevier, 2019, p. 89-126.

PAULINO, R. F. S. **Incorporação de novas tecnologias no setor sucroalcooleiro**: Produção de hidrogênio e aumento da oferta de eletricidade. 2014. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/123042/000823513.pdf?sequence=1> Acesso em: 14 fev. 2018.

PARTHASARATHY, P.; NARAYANAN K.S. Hydrogen production from steam gasification of biomass: influence of process parameters on hydrogen yield—a review. **Renewable Energy**, Amsterdã, v. 66, p. 570-579, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.025>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148113007027?via%3Dihub>. Acesso em: 18 jun. 2019.

PREFEITURA DE RIBEIRÃO PRETO. 2021. Disponível em: <https://www.ribeiraopreto.sp.gov.br/files/splan/planod/s-basico-residuos-25-10.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2021.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. 2021. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/subprefeituras/amlurb/index.php?p=185375>. Acesso em: 04 maio 2021
PRS- Portal dos Resíduos Sólidos. 2018.

Disponível em: portalresiduossolidos.com/destinacao-final-ambientalmente-adequada-de-residuos-solidos/. Acesso em: 04 set. 2018.

RÉBOLA L. B. **Análise de eficiência energética de um forno a plasma para vitrificação de cinzas**. 2018. Trabalho de Graduação. (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/155406>. Acesso em: 20 jun. 2021.

RECEITA FEDERAL. 2021. Disponível em: <http://www4.receita.fazenda.gov.br/simulador/Simulacao-tag.jsp>. Acesso em: 04 jun. 2021.

RISOTHERM. 2021. Disponível em: <https://risotherm.com.br/produto/manta-ritwool-bs-1000-2/>. Acesso em: 20 jun. 2021.

SIKARWAR, V. S.; ZHAO, M.; CLOUGH, P.; YAO, J.; ZHONG, X.; MOHAMMAD, Z. M. Z.; SHAH, N.; ANTHONY, E. J; FENNELL P. S. An overview of advances in biomass gasification. **Energy & Environmental Science**, London, v. 9, p.2939-2977, 2016. DOI: 10.1039/C6EE00935B. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2016/ee/c6ee00935b>. Acesso em: 15 mar. 2018.

SIKARWAR, V. S.; SINGH, V.; ZHAO, M.; FENNELL, P. S.; SHAH, N.; ANTHONY E. J. Progress in biofuel production from gasification. **Progress in Energy and Combustion Science**, Amsterdã, v. 61, pp.189-248, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.04.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036012851630106X>. Acesso em: 6 out. 2018.

SILVEIRA, J. L. **Sustainable hydrogen production processes**. 1. ed. Springer, 2017. v. 1. 185p.

SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E. Thermo-economic Analysis Method for Optimization of Combined Heat and Power Systems. Part I. **Progress in Energy and Combustion Science**, Amsterdã, v.29, n.1, p. 479-485, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(03\)00041-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(03)00041-8). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128503000418?via%3Dihub>. Acesso em: 18 jun. 2019.

SIMULADOR INFLAÇÃO DÓLAR. 2021. Disponível em: <https://clubedospoupadores.com/simulador-inflacao-dolar>. Acesso em: 04 jun. 2021.

SOLIMAN, S. M.; AHMED A. I. Overview of biomedical waste management in selected Governorates in Egypt: A pilot study. **Waste Management**, Amsterdã, v.27, v.12, p.1920-1923, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.08.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X06002583?via%3Dihub>. Acesso em: 18 jun. 2019.

SZARGUT, J; DAVID, R.; MORRIS, F. R. S. **Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes**. Universidade de Michigan, 332p., USA, 1988.

TENDLER, M.; RUTBERG, P.; OOST, G. V. **Plasma based waste treatment and energy production**. Plasma Physics and Controlled Fusion, London, v.47, p. 219-230, 2005.

Disponível em: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0741-3335/47/5A/016/meta?casa_token=2rLjhomUrysAAAAA:sN5M8PIqskp8TmnY43TVGk_vZ81gsaIXXHjZGfwyZIOg_y4WoGPaYRdri8z95cXnJhNmPIG7. Acesso em: 23 out. 2019

TRELLES, J.P.; CHAZELAS, C.; VARDELLE, A.; HEBERLEIN, J.V.R. Arc Plasma Torch Modeling. **Journal of Thermal Spray Technology**, London, v.18, n.728, 2009. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11666-009-9342-1>. Acesso em: 18 jun. 2019.

TIWARI, N.; NATH, S.; DHAMALE, G. D; GHORUI, S. Dynamic Behavior of Arc Voltage and Electro-thermal Efficiency in Atmospheric Pressure Non-transferred Arc Plasma Torches under Different Degrees of Anode Cooling. **Journal of Thermal Spray Technology**, London, v.28, p.1606–1626, 2019. DOI: 10.1007/s11666-019-00899-5. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019JTST...28.1606T/abstract>. Acesso em: 14 set. 2020.

TONUCI, L.R.S; PASCHOALATTO, C.F.P.R.; PISANIJR, R. Microwave inactivation of *Escherichia coli* in healthcare waste. **Waste Management**, Amsterdã, v. 28, pp. 840-848, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X07000669?via%3Dihub>. Acesso em: 5 fev. 2020.

TSATSARONIS, G. Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. **Energy**, Amsterdã, v. 32, p. 249-253. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.009> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X07000669?via%3Dihub>. Acesso em: 12 abr. 2020.

VILHENA A. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado /** Coordenação geral. – 4. ed. – São Paulo (SP): CEMPRE, 2018.

UTLU, Z.; SOGUT, Z; HEPBASLI, A.; OKTAY, Z. Energy nd exergy analysis if a raw mill in a cement production. **Applied Thermal Engineering**, Amsterdã, v.26, p.2479 -2489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.11.016>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431105004047?via%3Dihub>. Acesso em: 12 abr. 2020.

VILLELA, I. S. C. **Desenvolvimento de um modelo termoeconômico que considera os impactos ambientais**. 2007. Tese (Doutorado em engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/105356>. Acesso em: 25 set. 2020.

UOL ECONOMIA. 2021. Disponível em:<https://economia.uol.com.br/cotacoes/cambio/euro-uniao-europeia/> Acesso em: 04 mai. 2021.

XAVIER, B. H. **Thermodynamic, ecological and economic aspects of cogeneration systems with internal combustion engines operating on natural gas, biogas and synthesis gas**. Masters dissertation. School of Engineering, Campus Guaratinguetá, UNESP, in Portuguese, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/144327>. Acesso em: 5 ago. 2021

WANG, J.; MAO, T.; SUI, J.; JIN, H. “Modeling and performance analysis of CCHP (combined cooling, heating and power) system based on co-firing of natural gas and biomass gasification gas”. **Energy**, Amsterdã, v. 93 p. 801-815, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.091>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544215013018>. Acesso em: 21 set. 2020.

ZHANG, Q.; WU, Y.; DOR, L.; YANG, W.; BLASIAK, W. A thermodynamic analysis of solid waste gasification in the PlasmaGasification Melting process. **Applied Energy**, Amsterdã, v.112, p.405–413, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.054>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030626191300250X>. Acesso em: 30 maio 2021.

ZHANG, Q.; DOR, L.; FENIGSHTEIN, D.; YANG, W.; BLASIAK, W. Gasification of municipal solid waste in the Plasma Gasification Melting process. **Applied Energy**, Amsterdã p.106-112, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.041>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261911000596?via%3Dihub>. Acesso em: 30 maio 2021.

Zhao, P.; Ni, G.; Jiang, Y.; Chen, L.; Chen, M.; Meng, Y. Destruction of inorganic municipal solid waste incinerator fly ash in a DC arc plasma furnace. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdã, v. 181, n. 1–3, 15, p.580-585, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.052>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389410006357>. Acesso em: 2 fev. 2021.

ZHOVTYANSKY, V. E; VALINCIUS, V. Efficiency of Plasma Gasification Technologies for Hazardous Waste Treatment. **Gasification for Low-grade Feedstock**, IntetechOpen, London 2018, p. 142-189. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=rXCQDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA165&dq=Efficiency+of+Plasma+Gasification+Technologies+for+Hazardous+Waste+Treatment&ots=cbSnXU-WKa&sig=UPbdkiriRHbCUc8q_oJsiTCtQds#v=onepage&q=Efficiency%20of%20Plasma%20Gasification%20Technologies%20for%20Hazardous%20Waste%20Treatment&f=false. Acesso em: 9 mar. 2019.