



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ
Faculdade de Engenharia

Lucas Fachini Vane

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO EXERGONECONÔMICO-
AMBIENTAL: USO DO BIOGÁS EM MOTORES DE
COMBUSTÃO INTERNA**

Guaratinguetá

2016

Lucas Fachini Vane

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO EXERGOECONÔMICO-
AMBIENTAL: USO DO BIOGÁS EM MOTORES DE
COMBUSTÃO INTERNA**

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

Orientador: Prof. Dr. Júlio Santana Antunes

Coorientadores: Prof. Dr. José Luz Silveira

Prof. Dr. Wendell de Queiróz Lamas

Guaratinguetá

2016

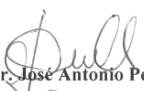
V249d	Vane, Lucas Fachini Desenvolvimento de método exergoeconômico-ambiental: uso do biogás em motores de combustão interna / Lucas Fachini Vane – Guaratinguetá, 2016 142 f. : il. Bibliografia: f. 130 Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016. Orientador: Prof. Dr. Júlio Santana Antunes Coorientadores: Prof. Dr. José Luz Silveira; Prof. Dr. Wendell de Queiróz Lamas 1. Biogás 2. Termodinâmica 3. Motores de combustão interna I. Título CDU 620.91(043)
-------	--

LUCAS FACHINI VANE

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

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JULIO SANTANA ANTUNES
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
UNESP/FEG


Prof. Dr. DANIEL TRAVIESO PEDROSO
UNESP/FEG


Prof. Dr. JOSÉ RUI CAMARGO
UNITAU


Prof. Dr. EDERALDO GODOY JUNIOR
UNITAU

Dezembro de 2016

Dados Curriculares

Lucas Fachini Vane

Nascimento	27/07/1982
Filiação	Luiz Antonio Vane Vilma Fachini Vane
2002 - 2009	Graduação em Engenharia Mecânica Automobilística. Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, FEI, Sao Paulo, Brasil
2010-2012	Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Sao Paulo, Brasil

Aos meus pais: Luiz e Vilma

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, sem o qual nada disso seria possível.

Aos meus pais, minha família, amigos e tantos outros cuja ajuda e apoio foram fundamentais para a conclusão dessa tese.

Ao meu orientador e meus coorientadores por todo o auxílio, paciência, amizade e dedicação durante o período de desenvolvimento dessa tese.

Aos amigos pesquisadores do Instituto de Pesquisa em Bioenergia IPBEN-UNESP Laboratório Associado e ao e Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos LOSE-FEG-UNESP, ambos de Guaratinguetá.

Aos funcionários da pós-graduação da FEG-UNESP por todo o auxílio, presteza, colaboração e profissionalismo.

Ao Fernando Henrique Mayworm de Araujo e a Regina Franciélle Silva Paulino por toda dedicação e companheirismo ao longo do desenvolvimento desta tese.

“O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de seus sonhos.” - Eleanor Roosevelt

VANE, L. F. **Desenvolvimento de método Exergoeconômico-ambiental: Uso do biogás em motores de combustão interna.** Guaratinguetá 2016. 142p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

Neste trabalho de tese é desenvolvido metodologias de análise exergoeconômica-ambiental aplicado em motores-gerador operando com biogás para produção simultânea de energia elétrica e água quente. O método desenvolvido tem como objetivo mensurar o custo das emissões de CO₂ para esse sistema, assim como estudar a sua influência no custo de operação pela técnica do custo de manufatura exergético. O método é aplicado a motores de combustão interna operando a biogás, com capacidade de produção de energia elétrica variando entre 4 kW a 2 MW, utilizando ou não a água da jaqueta para produção de água quente, dependendo do tipo de refrigeração do motos (a ar ou a água).

Dois métodos são aplicados para análise exergoeconômica-ambiental, o primeiro baseado no método da distribuição de custo pelos fluxos exergéticos unitários dos produtos e outro baseado nos incrementos exergéticos dos componentes do sistema.

Conclui-se que ambos os métodos são satisfatórios para avaliar o impacto do custo da emissão de poluentes e que a influência deste no custo de manufatura exergético incrementa entre 9,4 % e 19,6 % em relação aos métodos tradicionais que não consideram o custo da poluição ao meio ambiente.

PALAVRAS-CHAVES: Biogás. Aspectos Energéticos. Exergéticos e Ecológicos. Análise Exergoeconomica-ambiental.

VANE, L. F. **Development of an Exergo-economic-environmental method: Use of biogas in internal combustion engines.** Guaratinguetá 2016. 142p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

In this thesis an econometric-environmental analysis methodology applied in generator-engines operating with biogas for the simultaneous production of electric energy and hot water is developed. The method developed has the objective of measuring the cost of CO₂ emissions for this system, as well as to study its influence on the cost of operation by the technique of exergy cost of manufacture. The method is applied to internal combustion engines operating with biogas, with a production capacity of electric energy ranging from 4 kW to 2 MW, using or not the jacket water to produce hot water, depending on the type of engine cooling (air or water cooled).

Two methods are applied for exergoeconomic-environmental analysis, the first one based on the method of cost distribution by the unitary exergy flows of the products and another based on the exergetic increments of the system components.

It is concluded that both methods are satisfactory to evaluate the impact of the emission cost of pollutants and that the influence of this in the cost of exergético manufacture increases between 9,4% and 19,6% in relation to the traditional methods that do not consider the cost of pollution.

KEYWORDS: Biogas. Energy. Exergetic and ecologic aspects. Exergoeconomic-environmental analysis.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo de produção de biogás em uma estação de tratamento de efluentes	36
Figura 2: Conjunto Motor-Gerador	38
Figura 3: Ciclo Termodinâmico do Conjunto.....	39
Figura 4: Motor de combustão interna	45
Figura 5: Relação entre temperatura dos gases de exaustão e potência elétrica gerada	47
Figura 6: Trocador de calor	48
Figura 7: Volume de controle no motor.....	59
Figura 8: Volume de controle no trocador de calor para a análise exergética	61
Figura 9: Queima do biogás no motor de combustão interna.....	66
Figura 10: Ciclo de cogeração considerando a água da jaqueta.....	76
Figura 11: Volume de controle no MCI com o segundo trocador de calor.....	78
Figura 12: Volume de controle no trocador de calor da água da jaqueta.....	79
Figura 13: Cadeia lógica do conceito exergoeconômico.....	84
Figura 14: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização (método 1). 91	
Figura 15: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização (método 1) Fonte: Elaboração própria	91
Figura 16: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização, considerando as emissões de CO ₂ (método 1).....	93
Figura 17: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização, considerando as emissões de CO ₂ (método 1).....	93
Figura 18: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização, considerando as emissões de (CO ₂) _e (método 1)	95
Figura 19: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização, considerando as emissões de (CO ₂) _e (método 1)	95
Figura 20: Custo de manufatura exergético em função da taxa de juros (método 1).....	97
Figura 21: Custo de manufatura exergético em função da taxa de juros (método 1)	97
Figura 22: Custo de manufatura exergético em função do preço da tonelada de CO ₂ (método 1)	99

Figura 23: Custo de manufatura exergético em função do preço da tonelada de CO ₂ (método 1)	99
Figura 24: Composição do custo de manufatura exergético considerando o CO ₂	102
Figura 25: Composição do custo de manufatura exergético considerando o (CO ₂) _e	102
Figura 26: Diagrama funcional exergoeconômico do ciclo de cogeração sem considerar as emissões equivalentes de CO ₂	104
Figura 27: Custo manufatura exergético em função do período de amortização (método 2)	113
Figura 28: Custo manufatura exergético em função do período de amortização (método 2)	113
Figura 29: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização, considerando as emissões de CO ₂ (método 2)	115
Figura 30: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização, considerando as emissões de CO ₂ (método 2)	115
Figura 31: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização, considerando as emissões de (CO ₂) _e (método 2)	117
Figura 32: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização, considerando as emissões de (CO ₂) _e (método 2)	117
Figura 33: Custo da produção de energia elétrica em função da taxa de juros (k=12 anos e H=4380 horas)	119
Figura 34: Custo da produção de água quente em função da taxa de juros (k=12 anos e H=4150 horas)	119
Figura 35: Custo de manufatura exergética em função do preço da tonelada de CO ₂	121
Figura 36: Custo de manufatura exergética em função do preço da tonelada de CO ₂	121
Figura 37: Composição do custo de manufatura exergético considerando o CO ₂	124
Figura 38: Composição do custo de manufatura exergético considerando o (CO ₂) _e	124
Figura 39: Comparação dos dois métodos para o motor Branco BT-5000 bio	125
Figura 40: Comparação dos dois métodos para o motor Quantum Q3.3 TSI - 27,5 kWe	126
Figura 41: Comparação dos dois métodos para o motor Perkins 4008-30 TRS2 - 506 kWe	126
Figura 42: Comparação dos dois métodos para o motor MWM TCG 2020 V20 - 2000 kWe	127

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Concentrações máximas permitidas	30
Tabela 2: Composição média do biogás (Lora e Venturini, 2012)	31
Tabela 3: Poder Calorífico Inferior	33
Tabela 4: Composição Média do Gás de Aterro Sanitário (TCHOBANOGLIOUS <i>et al.</i> , 1994)	34
Tabela 5: Dados do Conjunto	39
Tabela 6: Pontos do ciclo de cogeração.....	40
Tabela 7: Dados experimentais do motor-gerador Branco	41
Tabela 8: Composição média do biogás	41
Tabela 9: Reação de combustão do biogás	42
Tabela 10: Consumo de biogás em função da carga no MCI	44
Tabela 11: Potência de eixo do MCI	46
Tabela 12 – Valores dos fluxos de massa da água quente	49
Tabela 13 – Valores dos fluxos de energia do sistema	51
Tabela 14 – Eficiências do ciclo de cogeração.....	53
Tabela 15: Dados para os pontos do sistema	58
Tabela 16: Resultados da análise exergética no MCI.....	61
Tabela 17: Resultados da análise exergética no trocador de calor	62
Tabela 18: Resultados da potência elétrica e irreversibilidade da bomba	64
Tabela 19: Emissões de alguns modelos de motores.....	67
Tabela 20: Comparativo de emissões de poluentes	68
Tabela 21: Referências de eficiências ecológicas.....	73
Tabela 22: Resultados da análise ecológica do biogás e do gás natural	74
Tabela 24: Descrição de pontos específicos do ciclo de cogeração da Figura 10	77
Tabela 25: Estimativa de custo médio da tonelada de carbono	82

Tabela 26: Parâmetros para o cálculo do investimento no conjunto motor-gerador	86
Tabela 27: Investimento no conjunto motor-gerador	86
Tabela 28: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização (método 1). 90	
Tabela 29: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização levando em conta as emissões de CO ₂ (método 1).....	92
Tabela 30: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização levando em conta as emissões de (CO ₂) _e (método 1)	94
Tabela 31: Custo de manufatura exergético em função da taxa de juros considerando as emissões de (CO ₂) _e (método 1).....	96
Tabela 32: Custo de manufatura exergético em função do preço da tonelada de CO ₂ (método 1)	98
Tabela 33: Comparativo entre as parcelas do sistema com o custo das emissões (método 1) ..	100
Tabela 34: Resultado dos cálculos dos fluxos exergéticos	107
Tabela 35: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização (método 2)	112
Tabela 36: Custo de manufatura exergético em função do preço da tonelada de CO ₂ (método 2)	114
Tabela 37: Custo de manufatura exergético em função do preço da tonelada de (CO ₂) _e (método 2)	116
Tabela 38: Custo de manufatura exergético em US\$/kWh.....	118
Tabela 39: Custo de manufatura exergético em função do preço da tonelada de CO ₂ (método 2)	120
Tabela 40: Custo de manufatura exergético em função do preço da tonelada de CO ₂	122
Tabela 41: Resultados para 25% de carga	139
Tabela 42: Resultados para 50% de carga	140
Tabela 43: Resultados para 75% de carga	141
Tabela 44: Resultados para 100% de carga	142

LISTA DE SÍMBOLOS

$(CO_2)_e$	Dióxido de carbono equivalente [kg_{CO_2}/kg_{comb}]
$(SO_2)_e$	Dióxido de enxofre equivalente no $(CO_2)_e$
$(NO_x)_e$	Dióxido de nitrogênio equivalente no $(CO_2)_e$
$(MP)_e$	Material particulado equivalente no $(CO_2)_e$
c_{AQ_1}	Custo específico da água quente produzida pelo trocador de calor 1 [US\$/kWh]
c_{AQ_2}	Custo específico da água quente produzida pelo trocador de calor 2 [US\$/kWh]
c_{co2}	Preço da tonelada de CO_2 [US\$/t]
c_{comb}	Preço do combustível [US \$/kWh]
c_{ele}	Custo específico da energia elétrica produzida [US\$/kWh]
CM_{ex}	Custo de manufatura exergético [US\$/h]
Cp_{gases}	Calor específico dos gases da combustão [kJ/kg.K]
C_r	Custo do equipamento de referência [US\$]
Ex_9	Fluxo exergético da água quente do trocador de calor 1 [kW]
Ex_{10}	Fluxo exergético da água quente do trocador de calor 2 [kW]
$\dot{E}_{aq}$	Potência da água quente [kW]
E_{CH}	Exergia química [kJ]
$\dot{E}_{comb}$	Potência térmica fornecida pelo combustível [kW]
$\dot{E}_{gases}$	Potência térmica dos gases de exaustão [kW]
E_{KN}	Exergia cinética [kJ]
E_{PH}	Exergia física [kJ]

$\dot{E}_{p \text{ motor}}$	Potência perdida no motor [kW]
E_{PT}	Exergia potencial [kJ]
$\dot{E}_{psist}$	Potência perdida no sistema [kW]
$\dot{E}_{x \text{ af}}$	Fluxo exergético da água fria a 25 °C [kW]
Ex_{af_e}	Fluxo exergético da água fria na entrada da bomba [kW]
Ex_{af_s}	Fluxo exergético da água fria na saída da bomba [kW]
$\dot{E}_{x \text{ aq}}$	Fluxo exergético da água quente a 65 °C [kW]
$\dot{E}_{x \text{ ar}}$	Fluxo exergético do ar a 25 °C [kW]
$ex_{biogás}$	Exergia específica do biogás [kJ/kg]
Ex_{bomba}	Fluxo exergético da bomba [kW]
ex_{comb}	Exergia específica do combustível [kJ/kg]
$\dot{E}_{x \text{ comb}}$	Fluxo exergético do combustível [kW]
$ex_{entrada}$	Exergia específica da água fria na entrada da bomba [kJ/kg]
$\dot{E}_{x \text{ esc}}$	Fluxo exergético dos gases de escapamento a 180 °C [kW]
$\dot{E}_{x \text{ exh}}$	Fluxo exergético dos gases de exaustão a 450 °C [kW]
ex_{gas}	Exergia específica dos gases de exaustão [kJ/kg]
ex_i	Exergia específica associada ao ponto i [kJ/kg]
$ex_{saída}$	Exergia específica da água fria na saída da bomba [kJ/kg]
f	Fator de anuidade [1/ano]
FP	Fator de ponderação pela exergia dos produtos [-]
FP'	Fator de ponderação pelo fluxo exergético incremental [-]
h	Entalpia específica do sistema para o dado estado [kJ/kg]
H	Período de operação da planta [h/ano]

h_0	Entalpia específica para o estado morto restrito [kJ/kg]
$h_{\text{água fria}}$	Entalpia específica da água fria [kJ/kg]
$h_{\text{água quente}}$	Entalpia específica da água quente [kJ/kg]
$\dot{I}$	Irreversibilidade [kW]
I_{motor}	Irreversibilidade do MCI [kW]
$\text{Inv}_{\text{BOMBA}_2/\text{TC}_2}$	Investimento no trocadores de calor 2 e bomba 2 [US\$]
$\text{Inv}_{\text{BOMBA}_1/\text{TC}_1}$	Investimento no trocadores de calor 1 e bomba 1 [US\$]
$\text{Inv}_{\text{MOTOR/GERADOR}}$	Investimento no conjunto motor-gerador [US\$]
I_{tc}	Irreversibilidade do trocador de calor [kW]
m	Inclinação da reta [-]
$\dot{m}$	Vazão mássica associada ao ponto i [kg/s]
$\dot{m}_{\text{água}}$	Fluxo massa de água no trocador de calor [kg/s]
M_{CO_2}	Massa molar do CO ₂ [g/mol]
$\dot{m}_{\text{comb}}$	Fluxo de massa de biogás [kg/s]
M_{comb}	Massa molar do combustível [g/mol]
$M_{\text{H}_2\text{S}}$	Massa molar do H ₂ S [g/mol]
M_{SO_2}	Massa molar do SO ₂ [g/mol]
$\dot{m}_{\text{água quente}}$	Fluxo de massa de água quente [kg/s]
$\dot{m}_{\text{gases}}$	Fluxo de massa dos gases da combustão [kg/s]
$\dot{m}_{\text{biogás}}$	Fluxo de massa de biogás [Nm ³ /s]
p_{atm}	Pressão atmosférica [kPa]
P_{eixo}	Potência útil do motor [kW]
$P_{\text{el bomba}}$	Potência elétrica consumida pela bomba [kW]
P_{ele}	Potência elétrica gerada [kW]
$\text{PCI}_{\text{biogás}}$	Poder calorífico inferior do biogás [kJ/kg]

Q_g	Vazão volumétrica de biogás [m^3/s]
s	Entropia específica do sistema para o dado estado [$kJ/kg.K$]
S	Capacidade do equipamento [kW]
S_r	Capacidade do equipamento de referência [kW]
s_0	Entropia específica para o estado morto restrito [$kJ/kg.K$]
T_{gas}	Temperatura dos gases de exaustão [K]
T_0	Temperatura do estado morto [$298 K$]
T_{esc}	Temperatura dos gases de escapamento [K]
T_{exh}	Temperatura dos gases de exaustão [K]
T_g	Temperatura do biogás [$^{\circ}C$]
w_{CO_2}	Mol de CO_2 nos gases da queima do biogás por mol de combustível [mol/mol]
Y	Incremento exergético [kW]
$Y_{0,j}$	Incremento exergético na saída o ambiente [kW]
$Y_{0,k}$	Incremento exergético na entrada do ambiente para o componente [kW]
$Y_{i,j}$	Incremento exergético na entrada do componente [kW]
$Y_{i,k}$	Incremento exergético na saída do componente [kW]

Letras Gregas

β	Função das frações de massa dos componentes do biogás [%]
ε	Eficiência ecológica do sistema de cogeração [-]
ε_{bomba}	Rendimento exergético da bomba [-]
ε_g	Rendimento exergético global do sistema [-]
ϕ	Fator de manutenção
η_{aq}	Eficiência de produção de água quente [-]
η_{el}	Eficiência de geração de energia elétrica [-]
η_g	Eficiência global do sistema [-]
n_{H_2S}	Massa de H ₂ S no combustível por massa de combustível [kg _{H2S} /kg _{comb}]
η_t	Eficiência térmica [-]
η_{tc}	Rendimento do trocador de calor [-]
η_g	Rendimento global do sistema de cogeração [-]
$\sum \dot{E}_e$	Somatório dos fluxos exergéticos na entrada [kW]
$\sum \dot{E}_s$	Somatório dos fluxos exergéticos na saída [kW]
ρ_{gn}	Massa específica do gás natural [kg/m ³]
ρ_g	Massa específica do biogás [kg/m ³]
Π_g	Indicador de poluição [kg CO ₂ /MJ]
ψ	Eficiência Exergética [%]

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
ÍNDICE DE FIGURAS	11
ÍNDICE DE TABELAS	13
LISTA DE SÍMBOLOS	15
SUMÁRIO.....	20
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	23
1.1 Generalidades	23
1.1.1 Objetivos	24
1.1.2 Estrutura da Tese	24
1.2.1 Energia.....	25
1.2.2 Exergia.....	25
1.2.3 Exergoeconomia	26
1.2.4 Emissões de CO ₂ no modelo exergoeconômico	29
1.2.5 Eficiência Ecológica.....	30
1.2.6 Biogás.....	31
1.2.7 Biogás de Aterro Sanitário	33
1.2.8 Biogás de Estação de Tratamento de Esgoto.....	35
CAPÍTULO 2 – ANÁLISE TERMODINÂMICA	38
2.1.1 Dados e Diagrama do Conjunto Motor-Gerador Utilizado	38
2.1.2 Análise do Combustível	42
2.1.3 Análise no trocador de calor.....	46
2.1.4 Perdas no Sistema de Cogeração.....	50
2.1.5 Eficiência do Sistema	52
2.2.1 Análise Exergética.....	54

2.2.2	Análise exergetica do ciclo de cogeração.....	57
2.2.3	Análise Exergetica do Combustível:	58
2.2.4	Análise Exergetica do Motor	59
2.2.5	Análise Exergetica do Trocador de Calor.....	61
2.2.6	Análise Exergetica da Bomba	63
2.2.7	Eficiência exergetica do ciclo de cogeração.....	64
CAPÍTULO 3 – EFICIÊNCIA ECOLÓGICA		66
3.1.1	Análise de emissões da queima de biogás	70
3.1.2	Cálculos da eficiência ecológica do sistema de cogeração	72
CAPÍTULO 4 – DESENVOLVIMENTO DE MODELO EXERGONECONÔMICO-AMBIENTAL.....		75
4.1.2	Determinação do Custo do Biogás	81
4.1.3	Custo de Manufatura Exergetico (CMex):	80
4.2.1	Método 1.....	82
4.2.2	Custo específico da produção de energia elétrica pelo método 1	84
4.2.3	Custo específico da produção de água quente pelo método 1	87
4.2.4	Fator de ponderação pela exergia dos produtos.....	89
4.2.5	Análise pelo método 1	89
4.2.6	Sem considerar as emissões de CO ₂	90
4.2.7	Considerando-se o custo das emissões de CO ₂	92
4.2.8	Considerando-se o custo do (CO ₂) _e	94
4.2.9	Influência da taxa de juros.....	96
4.2.10	Influência do preço da tonelada de CO ₂	98
4.2.11	Análise dos resultados obtidos para o método 1.....	100
4.3.1	Método 2:	103
4.3.2	Custo específico da produção de energia elétrica pelo método 2	108
4.3.3	Custo específico produção de água quente pelo método 2	109

4.3.4 Fator de ponderação pela contribuição exergética incremental dos componentes	111
4.3.5 Análise pelo método 2	111
4.3.6 Sem considerar as emissões de CO ₂	112
4.3.7 Considerando-se o custo das emissões de CO ₂	114
4.3.8 Considerando-se o custo do (CO ₂) _e	116
4.3.9 Influência da taxa de juros.....	118
4.3.10 Influência do preço da tonelada de CO ₂	120
4.3.11 Análise dos resultados obtidos para o método 2.....	122
4.4.1 Comparação dos métodos.....	125
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	128
REFERÊNCIAS	130
APÊNDICE	130

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Com a evolução da sociedade, cada vez mais se mostrou necessário conhecer e quantificar os recursos energéticos disponíveis. Tomando por exemplo os navios a vapor que surgiram durante o período da revolução industrial, eram de interesse do capitão desses conhecer o consumo de lenha ou carvão para que seu navio percorresse uma determinada distância, assim como para um industrial quantificar o custo da energia para operar sua fábrica. Desde então, diversos foram os métodos criados para quantificar e qualificar a energia. Dessas necessidades, surgiram as chamadas ciências térmicas. Dentre as quais, pode-se citar a termodinâmica, a transmissão de calor e a mecânica dos fluídos.

Dos estudos e resultados obtidos com base nas ciências acima, aliadas à necessidade de se obter o máximo de proveito da energia, culminando em redução dos custos de produção, surge a exergoeconomia.

A exergoeconomia (BEJAN *et al.*, 1996) é definida como sendo a combinação da segunda lei da termodinâmica (exergia) com conceitos de economia. A análise exergoeconômica de um sistema térmico tem ganhado cada vez mais relevância nas tomadas de decisão de operação de um sistema térmico, sem desprezar as análises de Primeira lei da termodinâmica (balanço energético).

1.1.1 Objetivos

O objetivo principal dessa tese de doutorado é desenvolver um método exergoeconômico-ambiental baseado em diagramas funcionais englobando o custo da poluição de cada componente do ciclo, possibilitando desse modo prever quais os melhores cenários de operação e permitir a obtenção do ponto ótimo para cada variável selecionada para o sistema.

Como objetivos específicos têm-se:

- Análise Energética e Exergética do ciclo de cogeração;
- Análise de impacto ambiental (eficiência ecológica).

1.1.2 Estrutura da Tese

Esta tese foi dividida em cinco capítulos.

No capítulo 1, estuda-se a produção de biodiesel, glicerina e hidrogênio e seus principais aspectos de forma geral, incluindo a situação atual no Brasil e no mundo.

No capítulo 2, efetuam-se estudos energéticos e exergéticos do sistema de cogeração utilizando-se do conjunto motor-gerador Branco. Determinam-se as irreversibilidades dos componentes, as exergias físicas e químicas associadas a cada fluxo da planta e os rendimentos exergéticos de cada componente.

No capítulo 3, efetuam-se estudos ecológicos da queima do biogás no motor de combustão interna. Determina-se o indicador de poluição, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) ou dióxido de carbono equivalente (CO₂e) em kg CO₂e por kg de combustível consumido e o rendimento ecológico. O indicador de poluição é determinado a partir da relação entre as emissões de dióxido de carbono equivalente e o poder calorífico do biogás.

No capítulo 4, desenvolve-se o método exergoeconômico-ambiental, baseando-se nos métodos propostos por SILVEIRA e TUNA, (2003 e 2004), aplicado a sistemas de cogeração operando a biogás produzindo energia elétrica (4 kW_{el} a 2 MW_{el}) e água quente a $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Finalmente, no capítulo 5, são tecidas as conclusões finais do trabalho de tese.

1.2.1 Energia

Diversos são os tipos de energia presentes em um sistema, sendo os mais comuns as energias cinética, potencial, elétrica, gravitacional, térmica e magnética. Em geral, existe mais de um componente em um dado tipo de energia, por exemplo, a energia mecânica é composta por uma parte de energia cinética e uma parte de energia potencial.

Calor e trabalho são casos especiais em que não são propriedades de um estado termodinâmico do sistema, são propriedades dos processos que transferem energia. Em geral, não se pode medir a quantidade de calor ou de trabalho presentes em um objeto, mas sim apenas quanta energia é transferida entre os objetos em certas maneiras durante a ocorrência de um determinado processo. Calor e trabalho são medidos como positivos ou negativos, dependendo do referencial adotado (SONNTAG *et al.*, 2003).

1.2.2 Exergia

Uma das principais razões para se realizar uma análise exergética é a possibilidade de identificar, precisamente, os componentes onde ocorrem as maiores perdas e desperdícios em um sistema.

A exergia, de acordo com a segunda lei da termodinâmica pode ser definida, de forma bastante simplificada, como sendo a qualidade da energia. Segundo Szargut *et al.* (1988), exergia é a quantidade de trabalho obtida quando

algum material é trazido a um estado de equilíbrio termodinâmico, com os componentes comuns do ambiente, por meio de processos reversíveis.

Enquanto a energia não pode ser destruída, a exergia não se conserva e pode ser destruída por completo. Pode-se citar como exemplo de exergia destruída por completo um sistema que entra em equilíbrio com o ambiente sem disto resultar algum trabalho útil (SILVEIRA e TUNA, 2004).

O balanço exergético diferencia-se do balanço energético pelo princípio que rege esses balanços. Enquanto o balanço de energia baseia-se na Lei de Conservação de Energia, o balanço exergético estabelece suas bases na perda irreparável de exergia (KOTAS, 1985).

1.2.3 Exergoeconomia

A exergoeconomia analisa o aspecto econômico da geração de energia do ponto de vista exergético. Bejan *et al.* (1996) e em El-Sayed (2003) realizara uma análise exaustiva do tema e podem ser encontradas em suas diversas obras publicadas.

No âmbito da exergoeconomia, o valor da energia em um dado sistema termodinâmico é minuciosamente estudado, analisando-se, por exemplo, a geração de calor e conversão de trabalho.

A exergoeconomia é baseada no fluxo exergético e na divisão do sistema em componentes individuais, permitindo assim uma análise pontual do conjunto.

Cada componente possui um ou mais fluxos de exergia na entrada e na saída. O fluxo de entrada pode ser tanto uma variável de entrada da planta ou mesmo um produto de um componente anterior e o fluxo de saída é um produto da planta ou a entrada de algum outro componente.

Em todos os componentes ocorrerão perdas exergéticas devido às irreversibilidades. Haverá também em alguns componentes um fluxo de exergia rejeitado, ou seja, esse fluxo não é mais útil ao processo e será descartado.

A análise exergoeconômica combina a análise econômica e a análise da segunda lei da termodinâmica, aplicando o conceito de custo, originalmente uma propriedade econômica, à exergia. A exergia de um fluxo termodinâmico é o mínimo de trabalho necessário para a sua produção, a partir do ambiente de referência. Uma vez definido o ambiente de referência, a exergia é uma função termodinâmica de estado que permite formular a equivalência entre diferentes fluxos de energia e/ou matéria de uma planta. Dois fluxos são termodinamicamente equivalentes, ou seja, teoricamente é possível obter um do outro sem consumo adicional de recursos energéticos se, e somente se, eles têm a mesma exergia. A eficiência energética compara um processo real com um processo ideal, isto é, reversível, do mesmo tipo. (VALERO *et al.*, 2006)

A exergoeconomia pode ser definida como sendo uma ciência que liga a termodinâmica e a economia, fornecendo assim uma poderosa ferramenta para se resolver problemas em sistemas de energéticos onde uma análise com base apenas na primeira lei da termodinâmica não conseguiria solucioná-los. (SANTOS *et al.*, 2016)

Pode-se citar como exemplos desses problemas a avaliação racional dos custos dos produtos de uma planta com base em critérios físicos, otimização local e diagnósticos de operação, entre outros (ERLACH *et al.*, 1999).

Diversas metodologias para a obtenção do ponto ótimo de operação de um sistema foram desenvolvidas nos últimos anos, tendo em comum a maneira pela qual o custo é calculado a partir de uma base racional (segunda lei da termodinâmica) (ERLACH *et al.*, 1999).

Segundo Tuna (1999), o principal objetivo de um estudo exergoeconômico é minimizar o custo exergético de um dado sistema. O resultado de uma análise exergoeconômica permite uma melhor avaliação de um projeto ou mesmo uma otimização de um sistema existente.

Os dois métodos mais utilizados para a realização da análise exergoeconômica são o método de contabilidade de custos (teoria de custos

exergéticos), o qual utiliza os custos médios como uma base para a valoração racional de custos e o método de otimização por análise funcional termoeconômica. O segundo utiliza-se dos custos marginais para minimizar os custos dos produtos de um sistema ou componentes (SILVEIRA e TUNA, 2003, 2004).

A contabilidade dos custos exergéticos é realizada através do balanço de custo, formulado para cada componente de um sistema. A soma dos custos associados a todos os fluxos de exergia na saída deve-se igualar a soma dos custos de todos os fluxos de exergia na entrada mais os custos devidos ao capital de investimento, operação e manutenção (TUNA, 1999).

Diversos fatores adicionais, tais como a poluição, a disponibilidade dos recursos naturais e a exergia associada ao processo de fabricação e reciclagem do equipamento usado também podem ser incorporados ao balanço de custo (VON SPAKOVSKY, 1994).

Em determinadas situações, sob um ponto de vista exergoeconômico, é necessário considerar um componente como um grupo de subsistemas, assim como considerar uma taxa de fluxo de exergia separada nos seus vários componentes, por exemplo, térmica, mecânica ou exergia química, ou mesmo em fluxos fictícios (sem a existência física do fluxograma da planta) (TORRES, 1996).

Coronado *et al.* (2010, 2014), aplicaram a metodologia de análise funcional termoeconômica para o estudo de uma planta de produção de biodiesel incorporando o custo do dióxido de carbono evitado procurando determinar o custo real da produção de biodiesel.

Boloy (2014) aplicou a metodologia da análise funcional termoeconômica para a produção de biodiesel utilizando óleo de canola, buscando, desse modo, minimizar o custo de produção do biodiesel através do processo de reforma a vapor da glicerina para produzir também hidrogênio.

1.2.4 Emissões de CO₂ no modelo exergoeconômico

As emissões de CO₂ associada a cada produto final de um sistema de cogeração podem ser utilizadas para relacionar a parcela de poluição referente a cada produto, ou seja, o quanto se poluiu para produzir aquele produto em específico. Em um cenário onde há o comércio de créditos de carbono, por exemplo, é possível estimar o quanto a emissão de CO₂ onerou o processo.

Pout e Hitchin (2005) realizaram um estudo da alocação do CO₂ produzido por um sistema de cogeração, dividindo-o de diferentes modos entre os produtos.

Holmberg *et al.* (2012) estudaram as emissões de CO₂ em uma planta de cogeração em uma indústria de papel e celulose. As emissões foram atribuídas pelo método energético, exergético e pelo método baseado no mercado (assume que todos os custos de combustível são inicialmente alocados para o calor e, em seguida, o valor da geração de energia é subtraído dos custos variáveis de calor).

Adam *et al.* (2013) apresentam um modelo para atribuir as emissões de CO₂ aos produtos de um micro sistema de cogeração utilizando células de combustível de óxido sólido para pequenas residências.

Santos *et al.* (2013) realizou uma modelagem exergoeconômica para alocação de CO₂ em um sistema de cogeração simples com uma turbina a vapor de contrapressão usando quatro diferentes abordagens do ponto ótimo.

Schüwer *et al.* (2016) utiliza um método matemático para a análise de plantas de cogeração produzindo entre 1 e 2800 kW_{el}, concluindo que a emissão de CO₂ é ligeiramente menor quando se prioriza a produção de calor.

Segundo Santos *et al.* (2016), embora diversas abordagens tenham sido propostas para estudar as emissões de CO₂ na cogeração, os resultados obtidos não foram iguais e não são universalmente aceitos, chegando a serem incompatíveis com a teoria da exergoeconomia.

Alguns dos métodos propostos ignoram a qualidade da energia e focam apenas na quantidade de energia envolvida no processo, o que pode subestimar a

percentagem das emissões atribuídas ao produto elétrico, ou seja, um valor fixo para a relação entre o combustível consumido para a geração de energia elétrica e o combustível consumido para geração de vapor fora utilizado (SANTOS *et al*, 2016).

1.2.5 Eficiência Ecológica

Com a crescente preocupação com o meio ambiente e as reduções de emissões de poluentes impostas por acordos internacionais, a análise ecológica de projetos tornou-se um ponto importante a ser abordado.

Os conceitos de eficiência ecológica, dióxido de carbono equivalente e indicador de poluição foram propostos por Cardu e Baica (1999), onde se apresentou a análise do impacto ambiental para plantas termoelétricas.

Partindo da equação do carbono equivalente $(CO_2)_e$ proposta por Villela e Silveira (2007) se realiza a análise ecológica da queima do biogás no MCI. Utilizando-se dos índices do Conselho Nacional do Meio Ambiente, Resolução nº 3 de 28 de junho de 1990, que estabelece o valor permitido para a concentração de material particulado como sendo de $150 \mu g/m^3$ e a concentração máxima de CO_2 de $10000 mg/m^3$, pode-se determinar os coeficientes da equação do dióxido de carbono equivalente $(CO_2)_e$. Deve-se então dividir a máxima concentração de CO_2 permitida pelos padrões de qualidade de ar ditados pela Organização Mundial da Saúde, para 1 hora de exposição, Tabela 1. (VILLELA e SILVEIRA, 2007)

Tabela 1- Concentrações máximas permitidas

Emissões	Concentração em 1 hora ($\mu g/m$)
NO_x	200
SO_2	125
MP	150
CO_2	1.10^6

Fonte: VILLELA e SILVEIRA, 2007

A eficiência ecológica, ε , indica a eficiência ecológica de um dado combustível ou sistema, que pode variar entre 0 e 1, onde 0 é um sistema muito poluidor e 1 é um sistema ideal. (VILLELA e SILVEIRA, 2007)

1.2.6 Biogás

Biogás é o nome dado ao composto proveniente da decomposição de matéria orgânica. Em sua composição encontra-se principalmente o metano e o dióxido de carbono. Lora e Venturini (2012) apresentam uma composição média do biogás proveniente de diferentes resíduos orgânicos (Tabela 2):

Tabela 2: Composição média do biogás (Lora e Venturini, 2012)

Componente	Porcentagem em Volume [%]
Metano (CH ₄)	40 a 75
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25 a 40
Hidrogênio (H ₂)	1 a 3
Nitrogênio (N ₂)	0,5 a 2,5
Oxigênio (O ₂)	0,1 a 1
Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S)	0,1 a 0,5
Amônia (NH ₃)	0,1 a 0,5
Monóxido de Carbono (CO)	0,0 a 0,1

Fonte: LORA e VENTURINI, 2012

Devido ao seu relativo baixo custo e facilidade de obtenção, o biogás vem despertando interesse de muitos nos tempos recentes. Quando liberado diretamente na atmosfera, o biogás pode ser considerado um agente poluidor devido à liberação de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), amônia (NH₃), hidrogênio (H₂), gás sulfídrico (H₂S) e nitrogênio (N₂) diretamente na atmosfera. Dessa forma, quando aproveitado em um motor de combustão interna para a

geração de energia elétrica, por exemplo, não só se aproveita do potencial energético do biogás como se colabora com o meio ambiente (OKANO *et al.*, 2006).

O Brasil, com seu vasto território, possui um enorme potencial para a produção de biogás. Pode-se citar como exemplos a produção em grandes centros urbanos, estações de tratamento de esgoto, na pecuária, entre outros. De acordo com Zanette (2009), o potencial brasileiro de produção de biogás supera os 50 milhões de m³ de CH₄ por dia.

O biogás geralmente é produzido através da digestão anaeróbica. Para que isto ocorra de maneira eficiente, algumas condições devem ser observadas (CHERNICHARO, 1997):

- Inexistência de ar: O oxigênio é letal para micro-organismos anaeróbicos;
- Controle de pH: Deve estar entre 6,6 e 7,4, faixa ideal para o crescimento das archeas produtoras de metano;
- Temperatura adequada: A faixa ideal se dá entre 30 e 40 °C;
- Nutrientes: A presença de alguns macronutrientes (carbono, nitrogênio, potássio, fósforo e enxofre) e de alguns micronutrientes é indispensável.

Para que o biogás possa ser utilizado em motores de combustão interna, alguns cuidados devem ser tomados. Entre eles estão a remoção da umidade do combustível e do sulfeto de hidrogênio (H₂S), o qual pode provocar a corrosão de alguns componentes do motor além de diminuir o poder calorífico do biogás.

O Poder Calorífico do Biogás está entre 22.500 a 25.000 kJ/m³. A Tabela 3 apresenta uma comparação do PCI do biogás com outros combustíveis gasosos (LORA e VENTURINI, 2012):

Tabela 3: Poder Calorífico Inferior

Gás	Poder Calorífico Inferior [kJ/m³]
Metano	35.558
Propano	92.109
Butano	117.230
Gás Natural	31.819
Biogás	23.027

Fonte: Lora e Venturini, 2012

Segundo a CENBIO (2013) o biogás apresenta inúmeras vantagens quando comparado a outros combustíveis. Suas características que mais se destacam são:

- Geração descentralizada;
- Contribuição para a viabilidade econômica do saneamento básico e do tratamento de resíduo sólido urbano;
- Possibilidade de uso de processos de cogeração;
- Redução das emissões de metano para a atmosfera, sendo esse um dos maiores responsáveis pelo efeito estufa;
- Redução do consumo de combustíveis fósseis.

1.2.7 Biogás de Aterro Sanitário

O biogás em aterros sanitários também é produzido através da decomposição de matéria orgânica presente nesses locais. Quando não aproveitado, o biogás produzido no aterro é queimado para que o mesmo não seja liberado diretamente na atmosfera. A Tabela 4 apresenta a composição média do gás presente no aterro sanitário:

Tabela 4: Composição Média do Gás de Aterro Sanitário (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1994)

Componente	Porcentagem em Volume [%]
Metano (CH ₄)	40 a 60
Dióxido de Carbono (CO ₂)	40 a 60
Nitrogênio (N ₂)	2 a 5
Oxigênio (O ₂)	0,1 a 1
Sulfetos	0,0 a 1
Amoníaco	0,1 a 1
Hidrogênio (H ₂)	0,0 a 0,2
Monóxido de Carbono (CO)	0,0 a 0,2
Outros Gases em Menor Concentração	0,01 a 0,6
Características	Valor
Temperatura	37 a 67 °C
Massa Específica [kg/m ³]	1,02 a 1,06
Contido em Umidade	Saturado
Poder Calorífico Superior [kCal/m ³]	890 a 1223

Fonte: Tchobanoglous *et al.*, 1994

Segundo Brito Filho (2005), a capacidade de um aterro gerar gás vai depender de muitos fatores, tais como, a composição do resíduo, pH, umidade, entre outros. Pode-se também citar outros fatores que influenciam na sua produção, como por exemplo:

- Composição do resíduo: Resíduos orgânicos são facilmente decompostos, facilitando assim a produção do biogás. Materiais de lenta decomposição pouco contribuem para a geração de gás nos aterros;

- Umidade: A umidade favorece a produção de gás, dessa forma, quanto maior o teor de umidade, maior será a taxa de produção do biogás;

- Tamanho das partículas: Partículas menores possuem uma maior área de superfície específica, dessa forma, se decompõem em um menor tempo;

- Temperatura: As condições de temperatura de um aterro influenciam os tipos de microorganismos predominantes e o nível de produção de gás. As máximas temperaturas do aterro frequentemente são alcançadas dentro de 45 dias após a disposição dos resíduos, como um resultado da atividade aeróbia microbiológica. Elevadas temperaturas de gás dentro de um aterro são o resultado da atividade biológica. As temperaturas típicas do gás produzido em um aterro variam, tipicamente, entre 30 °C e 60 °C.

Outros diversos fatores também podem ser citados, tais como PH, idade dos resíduos, tipos de microorganismos, compactação de resíduos, dimensões do aterro (área e profundidade), operação do aterro e processamento de resíduos variáveis. (FIGUEIREDO, 2007)

1.2.8 Biogás de Estação de Tratamento de Esgoto

O potencial energético do biogás produzido em estações de tratamento de esgoto é algo que não se pode ser ignorado. Segundo a *National Association of Clean Water Agencies* (2009), a matéria orgânica presente na água não tratada das estações contém aproximadamente dez vezes a energia necessária para seu tratamento. Desse modo, algumas estações de tratamento são capazes de produzir toda a energia necessária para sua operação.

Da mesma forma que nos aterros sanitários, a produção de biogás nas estações de tratamento se dá principalmente pela decomposição anaeróbica (microorganismos decompõem a matéria orgânica na ausência de oxigênio e produzem metano/dióxido de carbono) de matéria orgânica. A Figura 1 demonstra de forma simplificada o ciclo do biogás produzido em uma estação de tratamento de efluentes.

Figura 1: Ciclo de produção de biogás em uma estação de tratamento de efluentes



Fonte: Adaptada de BBC (<http://www.bbc.com/news/uk-11433162>)

Onde os efluentes produzidos passam por uma estação de tratamento onde o lodo é transferido para digestores anaeróbicos. No digestor, o resíduo sólido e o gasoso são separados. Os resíduos sólidos podem ser utilizados como fertilizante e o gasoso é então tratado na planta de produção de biogás. Este biogás pode ser queimado em um conjunto motor-gerador, produzindo energia elétrica e água quente para o consumidor.

Um ponto importante a se levar em consideração nesse tipo de processo de obtenção de biogás é a diluição dos dejetos. Para o caso de um tempo de retenção hidráulica de 30 dias, período no qual a matéria fica retida em um tanque para a produção do biogás, seria necessário um biodigestor de grande volume, o que, geralmente, inviabiliza o projeto.

Há projetos de biodigestores, no entanto, capazes de operar com um tempo de retenção hidráulica de apenas algumas horas. Este tipo de biodigestor retém a matéria orgânica como em um reator anaeróbio de manta de lodo (UASB).

Como vantagens do sistema manta de lodo, CHERNICHARO *et al.* (1999), têm-se:

- sistema compacto;
- baixo custo de implantação e de operação;
- baixa produção de lodo;
- baixo consumo de energia;
- eficiência da ordem de 65 – 75 %;
- possibilidade de rápido reinício.
- elevada concentração do lodo excedente
- boa desidratabilidade do lodo

CAPÍTULO 2 – ANÁLISE TERMODINÂMICA

A análise sob o ponto de vista da primeira lei da termodinâmica possibilita a obtenção dos rendimentos elétrico, térmico e global do ciclo. Com essa análise é possível identificar o quanto de energia é perdida quando o combustível é transformado nos produtos úteis do sistema.

2.1.1 Dados e Diagrama do Conjunto Motor-Gerador Utilizado

O conjunto motor-gerador considerado para esse estudo é o B4T – 5000 Bio da marca Branco. Esse conjunto é composto por um motor a ciclo Otto de quatro tempos e um gerador com uma potência nominal de 3,6 kW. Esse conjunto está disponível no LOSE (Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos na UNESP de Guaratinguetá). O estudo visa ser aplicado a todos os tipos de conjuntos motor-gerador operando a biogás.

A Figura 2 mostra o conjunto instalado em seu suporte no LOSE.

Figura 2: Conjunto Motor-Gerador



Cortesia: Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos

Além do motor-gerador (2), o suporte também possui um cilindro com biogás (3) para operação direta e também um conjunto de filtros (1) para a remoção de H_2S caso o mesmo seja operado com biogás direto de uma fonte.

Na Tabela 5 as especificações do conjunto estudado são apresentadas, de acordo com o fabricante.

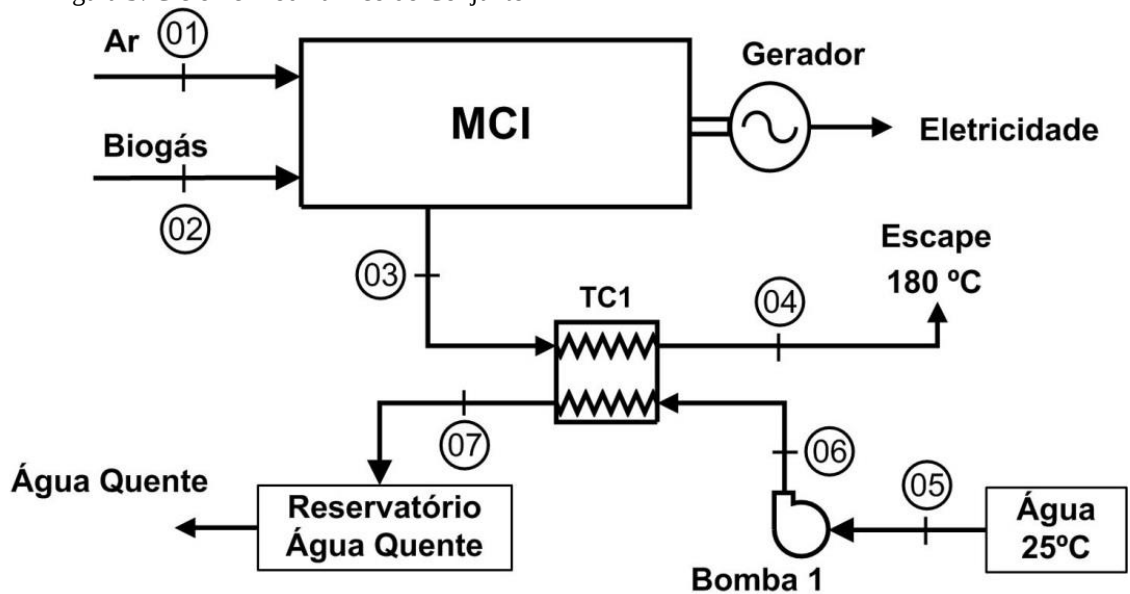
Tabela 5: Dados do Conjunto

Modelo	B4T – 5000 Bio
Potência	10 cv
N. Cilindros	Monocilíndrico, 4 tempos, resfriado a ar,
Cilindradas	389 cc
Potência máxima	4 kW
Potência nominal	3,6 kW
Voltagem	110/220 V
Frequência	60 Hz
Consumo	2 m ³ /h

Fonte: Catálogo do fabricante, Branco

Sob o ponto de vista termodinâmico, o sistema pode ser representado pela Figura 3:

Figura 3: Ciclo Termodinâmico do Conjunto



Fonte: Elaboração própria

Onde:

Tabela 6: Pontos do ciclo de cogeração

Ponto	Descrição
1	Entrada de ar
2	Entrada de combustível
3	Entrada dos gases de exaustão no trocador de calor
4	Saída dos gases quentes no trocador de calor
5	Entrada de água na bomba
6	Entrada de água fria no trocador de calor
7	Saída de água quente do trocador de calor

Fonte: Elaboração própria

O biogás alimenta, juntamente com ar, o motor de combustão interna que está acoplado ao gerador elétrico. O gerador converte potência de eixo do motor em potência elétrica. Um trocador de calor permite a recuperação de calor dos gases de exaustão do MCI para a produção de água quente como subproduto. A bomba fornece o fluxo de água fria do reservatório para o trocador de calor para ser aquecida por esse trocador.

Dessa forma, tem-se a geração de dois produtos distintos: energia elétrica e água quente, permitindo, assim, que a energia, antes não aproveitada, do calor dos gases de escape passe a gerar água quente.

Faria (2014) realizara um estudo experimental do conjunto estudado, mas sem levar em conta a cogeração. Em seu estudo, os gases de escapamento eram liberados diretamente na atmosfera. As tabelas de resultados, assim como um breve descritivo de seu estudo constam no apêndice dessa tese.

Dentre os dados obtidos por Faria (2014), foram selecionados, para as dadas cargas, os cenários onde há a maior potência elétrica gerada com o menor nível de emissões de CO, conforme a Tabela 7.

Tabela 7: Dados experimentais do motor-gerador Branco

Carga [%]	rpm	P _{el} [kW]	CO [%]	CO ₂ [%]	HC [ppm]	NO _x [ppm]	O ₂ [%]	Consumo [l/min]
25	3600	0,915	0,400	14,800	16	137	0,900	37
50	3600	2,202	0,180	14,900	23	302	1,00	46
75	3588	3,000	0,100	14,400	19	423	1,400	52
100	3468	4,017	0,110	15,200	43	706	0,700	60

Fonte: Faria, 2014

A composição do biogás adotada para a análise energética, exergética e exergoeconômica-ambiental, para ser possível a validação dos resultados obtidos, é a mesma utilizada por Faria (2014). A Tabela 8 mostra a composição do biogás adotada.

Tabela 8: Composição média do biogás

Componente	Porcentagem em volume [%]
Metano (CH ₄)	67,5 ± 0,3
Dióxido de Carbono (CO ₂)	24,1 ± 0,3
Nitrogênio (N ₂)	6,7 ± 0,2
Oxigênio (O ₂)	1,68 ± 0,2

Fonte: FARIA, 2014

Definido o biogás a ser utilizado, pode-se então fazer a reação de combustão (Tabela 9) para o cálculo do calor específico dos gases de exaustão. Para a combustão foi considerado um excesso de ar de 40 % (RODRIGUEZ, 2009).

Tabela 9: Reação de combustão do biogás

Composição do Biogás		Composição dos Gases de Exaustão	
	n_i [mols]		n_i [mols]
CH ₄	0,675	H ₂ O	1,350
O ₂	0,017	O ₂	0,077
CO ₂	0,241	CO ₂	0,916
N ₂	0,067	N ₂	5,371

Fonte: Elaboração própria

A partir da composição dos gases de exaustão apresentado na Tabela 9 e do calor específico dos componentes da mistura (Shen *et al.*, 2016), o calor específico dos gases de exaustão e pode ser obtido pela Equação (2.1).

$$cp_{gases} = 4,364 - \frac{0,560.T}{10^3} + \frac{3,451.T^2}{10^6} - \frac{3,184.T^3}{10^9} + \frac{0,945.T^4}{10^{12}} \quad (2.1)$$

Desse modo, tem-se um calor específico a pressão constante para os gases de exaustão a 450 °C de 1,280 kJ/kg.K.

2.1.2 Análise do Combustível

Um dado fundamental para a análise energética e a posterior análise exergética é saber o quanto de energia o combustível fornece. Conhecendo-se a vazão em litros por minuto de biogás queimado no motor para uma dada potência elétrica experimentalmente (FARIA, 2014), é possível calcular o fluxo de massa de biogás queimado no MCI. Para isso é necessário determinar sua massa específica.

Amestoy e Ferreira (1987) propuseram uma relação para quantificar a massa específica do gás natural em função da porcentagem volumétrica e seus

componentes, conforme definido pela Equação (2.2):

$$\rho_{gn} = \frac{[0,72(\%CH_4) + 1,96(\%CO_2)]}{100} \quad (2.2)$$

Onde:

ρ_{gn} Densidade do gás natural [kg/m³].

Como as propriedades do biogás variam de acordo com a temperatura e pressão do meio, Mitzlaff (1988) apresenta uma equação para se levar em conta essa variação, Equação (2.3):

$$\rho_g = \rho_{gn} \cdot \left(\frac{P_{atm}}{101,33} \right) \cdot \left(\frac{273}{T_g} + 273 \right) \quad (2.3)$$

Onde:

ρ_{gn} Massa específica do gás natural [kg/m³];
 ρ_g Massa específica do biogás [kg/m³];
 P_{atm} Pressão atmosférica [kPa];
 T_g Temperatura do biogás [°C].

Para a cidade de Guaratinguetá, adotou-se uma temperatura média de 25 °C e uma pressão atmosférica média de 95,3 kPa, se obtendo uma massa específica para o biogás de 0,834 kg/m³.

O fluxo de massa de biogás é dado pela Equação (2.4).

$$\dot{m}_{biogás} = Q_g \cdot \rho_g \quad (2.4)$$

Onde:

ρ_g	Massa específica do biogás [kg/m ³]
$\dot{m}_{biogás}$	Fluxo de massa de biogás [Nm ³ /s]
Q_g	Vazão volumétrica de biogás [m ³ /s]

Com a massa específica real do biogás e seu PCI (o biogás utilizado para os experimentos de Faria (2014) possui um PCI de 28975 kJ/kg), portanto, obtém-se a energia do combustível, conforme as Equações (2.4) e (2.5).

$$\dot{E}_{comb} = \dot{m}_{biogás} . PCI_{biogás} \quad (2.5)$$

Onde:

$\dot{E}_{comb}$	Potência térmica fornecida pelo combustível [kW];
$PCI_{biogás}$	Poder calorífico inferior do biogás [kJ/Nm ³];
$\dot{m}_{biogás}$	Fluxo de massa de biogás [Nm ³ /s].

Os resultados da potência térmica fornecida pelo combustível para as diversas cargas no gerador elétrico são apresentados na Tabela 10:

Tabela 10: Consumo de biogás em função da carga no MCI

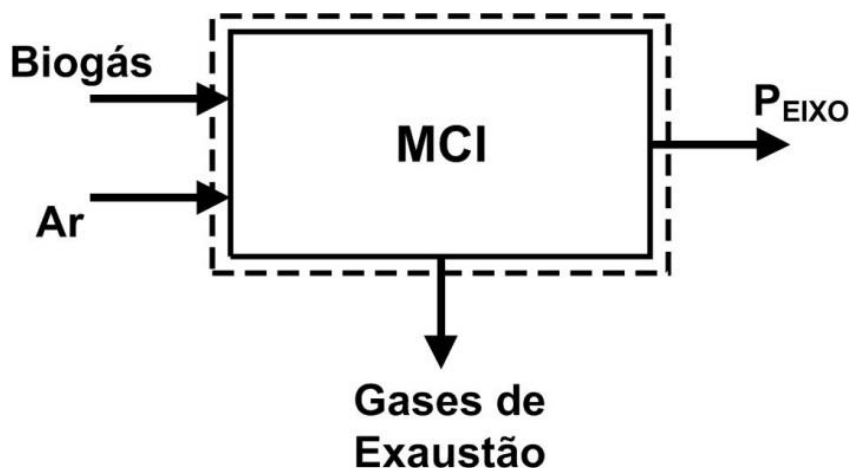
Carga [%]	P _{comb} [kW]	Consumo [Nm ³ /s]
25	12,43	2,484 x 10 ⁻⁴
50	15,45	3,088 x 10 ⁻⁴
75	17,13	3,423 x 10 ⁻⁴
100	19,82	3,960 x 10 ⁻⁴

Fonte: Elaboração própria

2.1.3 Análise do motor

A Figura 4 representa o volume de controle para o balanço de energia no motor de combustão interna.

Figura 4: Motor de combustão interna



Fonte: Elaboração própria

Biogás e ar adentram a câmara de combustão do MCI onde ocorre a queima. Dessa queima, resulta o trabalho de eixo e os gases de exaustão. Os gases irão aquecer a água fria no trocador de calor e a potência de eixo será convertida em potência elétrica no gerador.

Adotando um rendimento elétrico de 90 % (WEG, 2015) para o gerador e conhecendo-se a potência elétrica obtida experimentalmente por Faria (2014) é possível obter a potência de eixo, Equação (2.6).

$$P_{eixo} = \frac{P_{el}}{\eta_{gerador}} \quad (2.6)$$

Onde:

P_{eixo} Potência útil do motor [kW];

η_g Eficiência do gerador [-];

P_{el} Potência elétrica gerada [kW];

A potência útil do motor para as diversas cargas testadas é apresentada na Tabela 11:

Tabela 11: Potência de eixo do MCI

Carga [%]	RPM	P_{el} [kW]	P_{eixo} [kW]
25	3600	0,915	1,017
50	3600	2,202	2,447
75	3588	3,000	3,320
100	3468	4,017	4,450

Fonte: Elaboração própria

2.1.3 Análise no trocador de calor

O trocador de calor (Figura 4) utilizado é do tipo gás-água. Nele os gases de exaustão entram a 450 °C e saem a 180 °C. Mitzlaff (1988) dissera que a saída dos gases deve ser limitada a 180 °C, pois se a exaustão for a temperaturas abaixo dessa pode ocorrer a condensação do H_2S não extraído na saída do trocador de calor e causar corrosão no mesmo.

Segundo Mainier e Ramos (1982) se a saída dos gases ocorrer abaixo de 150 °C pode ocorrer a condensação de ácido sulfúrico. Pontos de corrosão localizados podem aparecer quando a temperatura de saída dos gases estiver entre 150 °C e 230 °C (ASM, 1987).

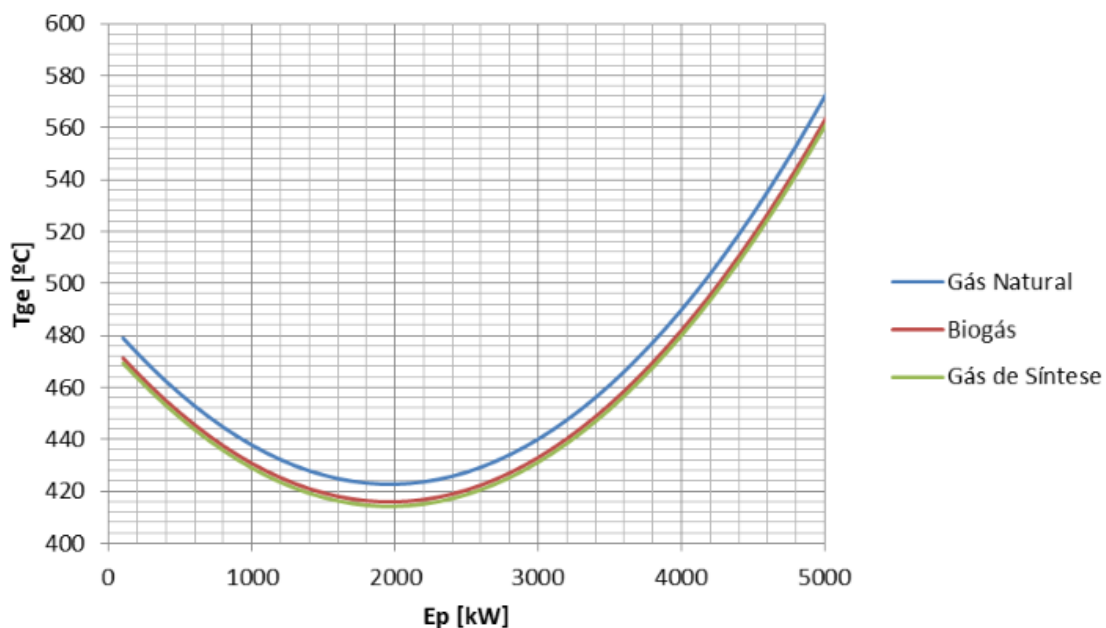
Vagapov *et al.* (2002) reportou em que o H_2S acelera a adsorção de hidrogênio pelo metal, o que o torna mais frágil.

Para temperaturas abaixo de 180 °C também se cria um ambiente propício para o SO₃ livre se transformar em ácido sulfúrico quando a concentração de água nos gases de escape for maior que 8 % (KASS, 2005; LAND, 2011). Desse modo, será adotada uma temperatura mínima para os gases na saída do trocador de calor de 180 °C.

Já a temperatura de 450 °C para os gases de exaustão foi estabelecida fazendo uma média dos diversos valores encontrados na literatura e em catálogos de fabricantes de motores de combustão interna.

A Figura 5 apresenta uma relação entre a potência elétrica gerada e a temperatura dos gases de escape (XAVIER, 2016).

Figura 5: Relação entre temperatura dos gases de exaustão e potência elétrica gerada

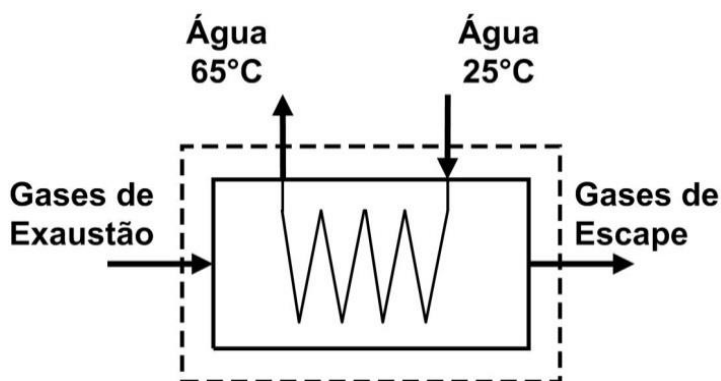


Fonte: Xavier, 2016

Conforme mostra a Figura 5, a temperatura dos gases de exaustão tendem a diminuir até a faixa de 2 MWe e aumenta após esse ponto.

O trocador de calor gás-líquido utilizado é representado pela Figura 6:

Figura 6: Trocador de calor



Fonte: Elaboração própria

Os gases de exaustão provenientes do MCI passam pelo trocador de calor, aquecendo a água fria que circula em seu interior. Os gases de escapamento são liberados diretamente na atmosfera.

Para os cálculos dessa tese foi adotado um rendimento de 80 % (REIS, 2006) para o trocador de calor. O fluxo de água na saída do trocador de calor é dado pela Equação (2.7).

$$\eta_{tc} = \frac{\dot{m}_{\text{água}} \cdot (h_{\text{água quente}} - h_{\text{água fria}})}{\dot{m}_{\text{gases}} \cdot C_{p_{\text{gases}}} \cdot (T_{\text{exh}} - T_{\text{esc}})} \quad (2.7)$$

Onde:

η_{tc}	Rendimento do trocador de calor [-];
$\dot{m}_{\text{água}}$	Fluxo massa de água no trocador de calor [kg/s];
$h_{\text{água quente}}$	Entalpia específica da água quente [kJ/kg];
$h_{\text{água fria}}$	Entalpia específica da água fria [kJ/kg];
$\dot{m}_{\text{gases}}$	Fluxo de massa dos gases da combustão [kg/s];
Cp_{gases}	Calor específico dos gases de exaustão [kJ/kg.K];
T_{exh}	Temperatura dos gases de exaustão [K];
T_{esc}	Temperatura dos gases de escapamento [K].

A temperatura de entrada e saída da água pode variar de acordo com a instalação. Para efeito de cálculo será considerado a água fria entrando a 25 °C e a água quente saindo do trocador de calor a 65 °C. Os resultados do fluxo de água quente para a carga correspondente aplicada ao gerador elétrico são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores dos fluxos de massa da água quente

Carga [%]	$\dot{m}_{\text{gases}}$ [kg/s]	$\dot{m}_{\text{água}}$ [kg/s]
25	0,032	0,056
50	0,040	0,070
75	0,044	0,078
100	0,052	0,091

Fonte: Elaboração própria

2.1.4 Perdas no Sistema de Cogeração

No cálculo da potência perdida no motor deve-se descontar a potência útil da potência fornecida. A perda no motor indica o quanto de potência do combustível foi perdida para se gerar, nesse caso, potência de eixo. Como o sistema também gera água quente, a potência nos gases de escape também será um subproduto da queima do combustível no MCI e deverá ser computado, conforme representado pela Equação (2.8).

$$\dot{E}_{p\ motor} = \dot{E}_{comb} - P_{eixo} - \dot{E}_{gases} \quad (2.8)$$

Onde:

$\dot{E}_{p\ motor}$	Potência perdida no motor [kW];
$\dot{E}_{comb}$	Potência térmica fornecida pelo combustível [kW];
P_{eixo}	Potência útil do motor [kW];
$\dot{E}_{gases}$	Potência térmica dos gases de exaustão [kW].

Já para as perdas no sistema, considera-se a troca de calor dos gases de exaustão com a água no trocador de calor, ou seja, ao invés de se considerar a potência térmica dos gases de exaustão considera-se a potência da água quente na saída do trocador de calor representada pela Equação (2.9).

$$\dot{E}_{p\ sist} = \dot{E}_{comb} - P_{el} - \dot{E}_{aq} \quad (2.9)$$

Onde:

P_{eixo}	Potência útil no motor [kW];
$\dot{E}_{\text{comb}}$	Potência térmica fornecida pelo combustível [kW];
$\dot{E}_{\text{psist}}$	Potência perdida no sistema [kW];
$\dot{E}_{\text{aq}}$	Potência da água quente [kW].

A potência fornecida pelos gases para a água quente pode ser calculada pelo fluxo de água e sua entalpia específica na temperatura de saída do trocador de calor, Equação (2.10).

$$\dot{E}_{\text{aq}} = \dot{m}_{\text{água quente}} \cdot (h_{\text{água quente}} - h_{\text{água fria}}) \quad (2.10)$$

Onde:

$\dot{m}_{\text{água quente}}$	Fluxo de massa de água quente [kg/s];
$h_{\text{água fria}}$	Entalpia específica da água fria (25 °C) [kJ/kg];
$h_{\text{água quente}}$	Entalpia específica da água quente (65 °C) [kJ/kg].

O resultado dos cálculos das perdas é apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores dos fluxos de energia do sistema

Carga [%]	$\dot{E}_{\text{comb}}$ [kW]	$\dot{E}_{\text{p motor}}$ [kW]	$\dot{E}_{\text{p sist}}$ [kW]	$\dot{E}_{\text{aq}}$ [kW]	$\dot{E}_{\text{gases}}$ [kW]
25	14,902	13,670	12,714	1,273	2,053
50	18,526	15,940	14,741	1,583	2,553
75	20,540	17,113	15,785	1,755	2,830
100	24,165	19,668	18,084	2,064	3,330

Fonte: Elaboração própria

2.1.5 Eficiência do Sistema

O cálculo das eficiências do sistema de cogeração indica o quanto de um dado produto do ciclo foi obtido para uma dada quantia de energia fornecida, ou seja, quando se obteve por quanto se forneceu. A soma desses dois resultará no rendimento global do sistema.

Para o caso da energia elétrica produzida, a eficiência elétrica será a potência elétrica gerada pela potência que fornecida pelo combustível, Equação (2.11).

$$\eta_{el} = \frac{P_{ele}}{\dot{E}_{comb}} \quad (2.11)$$

Onde:

η_{el}	Eficiência de geração de energia elétrica [-];
P_{ele}	Potência elétrica gerada [kW];
$\dot{E}_{comb}$	Potência térmica fornecida pelo combustível [kW].

Já para a água quente, a eficiência é dada pela quantidade de calor que os gases de exaustão forneceram para a água fria pela potência fornecida pelo combustível, Equação (2.12).

$$\eta_{aq} = \frac{\dot{E}_{aq}}{\dot{E}_{comb}} \quad (2.12)$$

Onde:

η_{aq}	Eficiência de produção de água quente [-];
$\dot{E}_{aq}$	Potência da água quente [kW]

$\dot{E}_{comb}$ Potência térmica fornecida pelo combustível [kW].

Como os dois produtos do sistema são a água quente e a energia elétrica, a eficiência global do ciclo de cogeração pode ser expressa pela Equação (2.13).

$$\eta_g = \eta_{el} + \eta_{aq} \quad (2.13)$$

Onde:

η_g Eficiência global do sistema [-];

η_{aq} Eficiência de produção de água quente [-];

η_{el} Eficiência de geração de energia elétrica [-].

Das Equações (2.11), (2.12) e (2.13) obtêm-se os seguintes resultados para os rendimentos de primeira lei da termodinâmica para o ciclo de cogeração listados na Tabela 14.

Tabela 14 – Eficiências do ciclo de cogeração

Carga [%]	$\eta_{g\ el}$ [%]	η_{aq} [%]	$\eta_{global\ cog}$ [%]
25	6,14	15,08	21,22
50	11,89	15,08	26,97
75	14,61	15,08	29,69
100	16,90	15,08	31,99

Fonte: Elaboração própria

2.2.1 Análise Exergética

A exergia total de um sistema pode ser dividida em quatro componentes, conforme a Equação (2.14) (TUNA, 1999).

$$Ex = Ex_{PH} + Ex_{KN} + Ex_{PT} + Ex_{CH} \quad (2.14)$$

Onde:

Ex_{PH} Exergia física [kJ];

Ex_{CH} Exergia química [kJ];

Ex_{PT} Exergia potencial [kJ];

Ex_{KN} Exergia cinética [kJ].

- Exergia Física

A exergia física pode ser definida, segundo Szargut *et al.* (1988) como sendo o máximo trabalho obtido quando o sistema passa de seu estado inicial (T e p) para o estado morto restrito (T_0 e p_0), ou seja, ao atingir o estado morto o sistema não tem mais capacidade de gerar trabalho. A exergia física pode ser calculada pela Equação (2.15). Nessa equação considera-se apenas a parcela referente ao equilíbrio termodinâmico.

$$ex_{PH} = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0) \quad (2.15)$$

Onde:

- h Entalpia específica do sistema para o dado estado [kJ/kg];
- s Entropia específica do sistema para o dado estado [kJ/kg.K];
- h_0 Entalpia específica para o estado morto restrito [kJ/kg];
- s_0 Entropia específica para o estado morto restrito [kJ/kg.K];
- T_0 Temperatuda do estado morto [298 K].

- Exergia Química

Szargut *et al.* (1988) definiram a exergia química como sendo semelhante à definição de exergia física, mas com algumas diferenças. A exergia química é definida como o trabalho máximo que pode ser obtido quando o sistema em questão reage com substâncias de referência presentes no ambiente.

Para os gases de exaustão e para o ar, por exemplo, utiliza-se a Equação (2.16).

$$ex_i = cp_{gás} \cdot [T_{gás} - T_0 - T_0 \cdot \ln(\frac{T_{gás}}{T_0})] \quad (2.16)$$

Onde:

- ex_{gas} Exergia específica dos gases de exaustão [kJ/kg];
- T_{gas} Temperatura dos gases de exaustão [K];
- T_0 Temperatuda do estado morto [298 K];
- cp_{gases} Calor específico dos gases de exaustão [kJ/kg.K].

Para calcular a exergia em um ponto específico, utiliza-se a Equação (2.17).

$$Ex_i = \dot{m} \cdot ex_i \quad (2.17)$$

Onde:

ex_i Exergia específica associada ao ponto i [kJ/kg];

$\dot{m}$: Vazão mássica associada ao ponto i [kg/s].

- Perdas Exergéticas

Em um processo real, a exergia de entrada sempre irá superar a exergia de saída. Essas perdas são chamadas de irreversibilidade.

A exergia de saída leva em conta a exergia utilizada e a não utilizada, ou seja, a exergia dos resíduos.

É importante distinguir entre a exergia destruída pela irreversibilidade e a energia desperdiçada pela não utilização da exergia.

Szargut *et al.* (1988) também define a irreversibilidade de um sistema como a Equação (2.18).

$$\dot{I} = \sum \dot{E}_e - \sum \dot{E}_s \quad (2.18)$$

Onde:

$\dot{I}$ Irreversibilidade [kW];

$\sum \dot{E}_e$ Somatório dos fluxos exergéticos na entrada [kW];

$\sum \dot{E}_s$ Somatório dos fluxos exergéticos na saída [kW].

Já a eficiência racional, ou de Bonsjakovic, definida pela razão entre a somatória dos fluxos exergéticos de entrada e a somatória dos fluxos exergéticos de saída, pode ser obtida pela Equação (2.19).

$$\psi = \frac{\sum E_{x_s}}{\sum E_{x_e}} \quad (2.19)$$

Onde:

$\sum E_e$ Somatório dos fluxos exergéticos na entrada [kW];

$\sum E_s$ Somatório dos fluxos exergéticos na saída [kW].

2.2.2 Análise exergética do ciclo de cogeração

Partindo do ciclo proposto na Figura 2 para a análise da primeira lei da termodinâmica e conhecendo-se os valores da exergia para um dado ponto no sistema, pode-se então calcular a eficiência racional e a irreversibilidade para cada componente do sistema. Os resultados obtidos nessa etapa serão a base para a posterior análise exergoeconômica-ambiental. É considerada para a análise exergética a temperatura ambiente de 25 °C e pressão atmosférica de 101,325 kPa.

Para os dados pontos do sistema, têm-se os valores listados na Tabela 15.

Tabela 15: Dados para os pontos do sistema

Ponto	Temperatura [°C]	Pressão [kPa]	Exergia Específica [kJ/kg]
01	25,0	101,3	0,0
02	25,0	101,3	24094
03	85,0	140,5	22,4
04	67,0	140,5	11,4
05	25,0	101,3	0,0
06	25,0	140,5	0,039
07	25,0	140,5	0,039

Fonte: Elaboração própria

2.2.3 Análise Exergética do Combustível:

Segundo Szargut *et al.* (1988) a exergia química do combustível é dada pelas Equações (2.20) e (2.21):

$$ex_{comb} = \beta_{gás} \cdot PCI_{biogás} \quad (2.20)$$

$$\beta = 1,0334 + 0,0183 \cdot \frac{H}{C} - 0,0694 \cdot \frac{1}{N_c} \quad (2.21)$$

Onde:

ex_{comb} Exergia específica do combustível [kJ/kg];
 $PCI_{biogás}$ Poder calorífico inferior do biogás [kJ/kg].

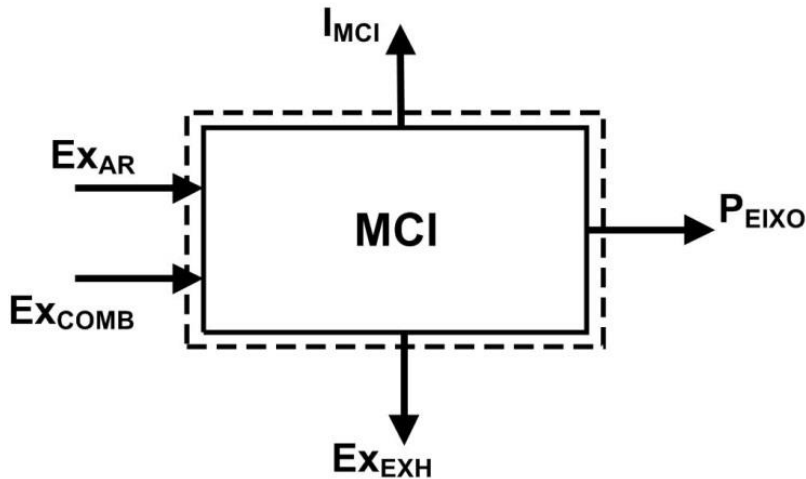
Substituindo-se os valores na Equação (2.20), tem-se:

$$ex_{comb} = 24575,32 \text{ kW}$$

2.2.4 Análise Exergética do Motor

Fazendo-se o volume de controle no motor, tem-se a Figura 7.

Figura 7: Volume de controle no motor



Fonte: Elaboração própria

Onde:

$E_{x \text{ comb}}$	Fluxo exérgico do combustível [kW];
$E_{x \text{ ar}}$	Fluxo exérgico do ar a 25 °C [kW];
$E_{x \text{ exh}}$	Fluxo exérgico dos gases de exaustão a 450 °C [kW];
P_{eixo}	Potência útil do motor [kW].

Da mesma forma que para o volume de controle para a análise de primeira lei da termodinâmica ou análise energética, o combustível reage na câmara de combustão resultando a potência de eixo e os gases de exaustão.

Para a temperatura ambiente de 25 °C, a fluxo exérgico do ar será zero (Szargut *et al.*, 1988). Já para o combustível, ela pode ser calculada utilizando-se a Equação (2.22):

$$\dot{E} x_{comb} = \dot{m}_{biogás} \cdot ex_{biogás} \quad (2.22)$$

Onde:

$\dot{E} x_{comb}$	Fluxo exergético do combustível [kW];
$\dot{m}_{comb}$	Fluxo de massa de biogás [kg/s];
$ex_{biogás}$	Exergia específica do biogás [kJ/kg].

A irreversibilidade do motor é obtida pela somatória dos fluxos exergéticos de entrada subtraída da somatória dos fluxos exergéticos de saída, Equação (2.23).

$$\dot{I}_{motor} = \dot{E} x_{comb} + \dot{E} x_{ar} - P_{eixo} - \dot{E} x_{exh} \quad (2.23)$$

Onde:

$\dot{I}_{motor}$	Irreversibilidade do MCI [kW];
$\dot{E} x_{comb}$	Fluxo exergético do combustível [kW];
$\dot{E} x_{ar}$	Fluxo exergético do ar a 25 °C [kW];
$\dot{E} x_{exh}$	Fluxo exergético dos gases de exaustão a 450 °C [kW];
P_{eixo}	Potência útil do motor [kW].

Os resultados do cálculo do fluxo exergético do combustível e da irreversibilidade do motor são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Resultados da análise exergética no MCI

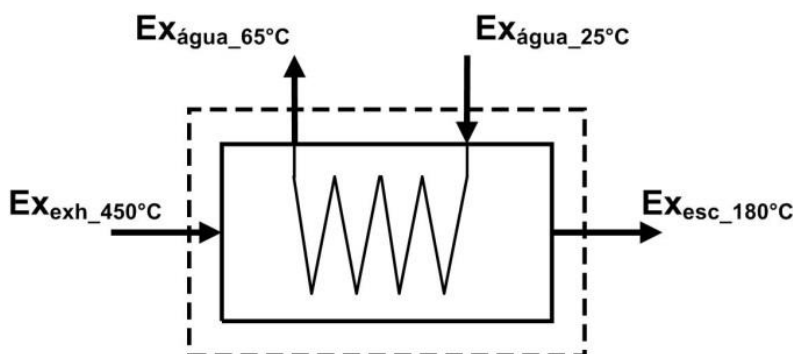
Carga [%]	$\dot{E} x_{\text{comb}}$ [kW]	$\dot{E} x_{\text{ar}}$ 25 °C [kW]	$\dot{E} x_{\text{exh}}$ 450 °C [kW]	P_{eixo} [kW]	$\dot{I}_{\text{motor}}$ [kW]	Ψ_{motor} [%]
25	15,200	0,000	0,973	0,963	13,264	12,739
50	18,903	0,000	1,211	2,317	15,376	18,661
75	20,951	0,000	1,342	3,145	16,465	21,415
100	24,648	0,000	1,578	4,228	18,842	23,557

Fonte: Elaboração própria

2.2.5 Análise Exergética do Trocador de Calor

Aplicando novamente o volume de controle, mas dessa vez para o trocador de calor, Figura 8.

Figura 8: Volume de controle no trocador de calor para a análise exergética



Fonte: Elaboração própria

Os gases de exaustão entram a 450 °C no trocador de calor e saem a 180 °C. Já a água fria entra a 25 °C e deixa o trocador de calor a 65 °C.

A irreversibilidade no trocador de calor pode ser calculada levando em conta a entrada dos gases de exaustão e a saída dos gases de escapamento e a água quente, Equação (2.24):

$$\dot{I}_{tc} = \dot{E} x_{exh} + \dot{E} x_{af} - \dot{E} x_{esc} - \dot{E} x_{aq} \quad (2.24)$$

Onde:

- $\dot{I}_{tc}$ Irreversibilidade do trocador de calor [kW];
- $\dot{E} x_{exh}$ Fluxo exergético dos gases de exaustão a 450 °C [kW];
- $\dot{E} x_{esc}$ Fluxo exergético dos gases de escapamento a 180 °C [kW];
- $\dot{E} x_{aq}$ Fluxo exergético da água quente a 65 °C [kW];
- $\dot{E} x_{af}$ Fluxo exergético da água fria a 25 °C [kW].

A Tabela 17 apresenta os resultados da análise exergética do trocador de calor:

Tabela 17: Resultados da análise exergética no trocador de calor

Carga [%]	$\dot{E} x_{exh_450\text{ °C}}$ [kW]	$\dot{E} x_{esc_180\text{ °C}}$ [kW]	$\dot{E} x_{\text{água_25 °C}}$ [kW]	$\dot{E} x_{\text{água_65 °C}}$ [kW]	$\dot{I}_{tc}$ [kW]	Ψ_{TC} [%]
25	0,973	0,183	0	0,041	0,749	23
50	1,211	0,227	0	0,083	0,901	23
75	1,342	0,252	0	0,091	0,998	23
100	1,578	0,296	0	0,107	1,175	23

Fonte: Elaboração própria

A eficiência racional para o trocador de calor se mantém constante, pois o fluxo de água é proporcional à potência, ou seja, quanto mais energia elétrica for gerada, maior será o fluxo de massa de água quente que sai do trocador de calor.

2.2.6 Análise Exergética da Bomba

A bomba irá suprir o trocador de calor com a água fria proveniente de um reservatório ou da rede para ser aquecida. A temperatura na entrada e na saída da bomba é considerada igual e seu rendimento é adotado como sendo 85% (INMETRO, 2015). A potência elétrica utilizada pela bomba pode ser calculada pela Equação (2.25).

$$\varepsilon_{bomba} = \frac{\dot{m}_{\text{água}} \cdot (ex_{\text{saída}} - ex_{\text{entrada}})}{P_{el\ bomba}} \quad (2.25)$$

Onde:

ε_{bomba}	Rendimento da bomba [-];
$P_{el\ bomba}$	Potência elétrica consumida pela bomba [kW];
ex_{entrada}	Exergia específica da água fria na entrada da bomba [kJ/kg];
$ex_{\text{saída}}$	Exergia específica da água fria na saída da bomba [kJ/kg].

O fluxo exergético da bomba é dado pela Equação 2.26:

$$\dot{E}x_{af_e} + P_{el\ bomba} = \dot{E}x_{af_s} + \dot{I}_{bomba} \quad (2.26)$$

Onde:

$\dot{I}_{bomba}$	Irreversibilidade da bomba [kW];
$P_{el\ bomba}$	Potência elétrica consumida pela bomba [kW];
$\dot{E}x_{af_e}$	Fluxo exergético da água fria na entrada da bomba [kW];
$\dot{E}x_{af_s}$	Fluxo exergético da água fria na saída da bomba [kW].

Os fluxos exergéticos da água na entrada e na saída da bomba, assim como sua irreversibilidade são apresentados na Tabela 18:

Tabela 18: Resultados da potência elétrica e irreversibilidade da bomba

Carga [%]	$P_{el\ bomba}$ [kW]	$\dot{E}x_{\text{água entrada}}$ [kW]	$\dot{E}x_{\text{água saída}}$ [kW]	$\dot{I}_{bomba}$ [kW]
25	$2,89 \times 10^{-4}$	0,00	$2,66.10^{-4}$	$2,29 \times 10^{-5}$
50	$3,59 \times 10^{-4}$	0,00	$3,31.10^{-4}$	$2,85 \times 10^{-5}$
75	$3,98 \times 10^{-4}$	0,00	$3,66.10^{-4}$	$3,16 \times 10^{-5}$
100	$4,68 \times 10^{-4}$	0,00	$4,31.10^{-4}$	$3,72 \times 10^{-5}$

Fonte: Elaboração própria

Devido à bomba possuir fluxos exergéticos e irreversibilidade muito inferiores comparados a outros componentes do sistema, sua contribuição será desprezada no desenvolvimento dos cálculos.

2.2.7 Eficiência exergética do ciclo de cogeração

A eficiência exergética do ciclo de cogeração estudado é dada pela Equação (2.27).

$$\varepsilon_g = \frac{\dot{E}x_{aq} + P_{ele}}{\dot{E}x_{COMB}} \quad (2.27)$$

Onde:

$\dot{E}_{x\text{ aq}}$ Fluxo exergético da água quente a 65 °C [kW];

$\dot{E}_{x\text{ comb}}$ Fluxo exergético do combustível [kW];

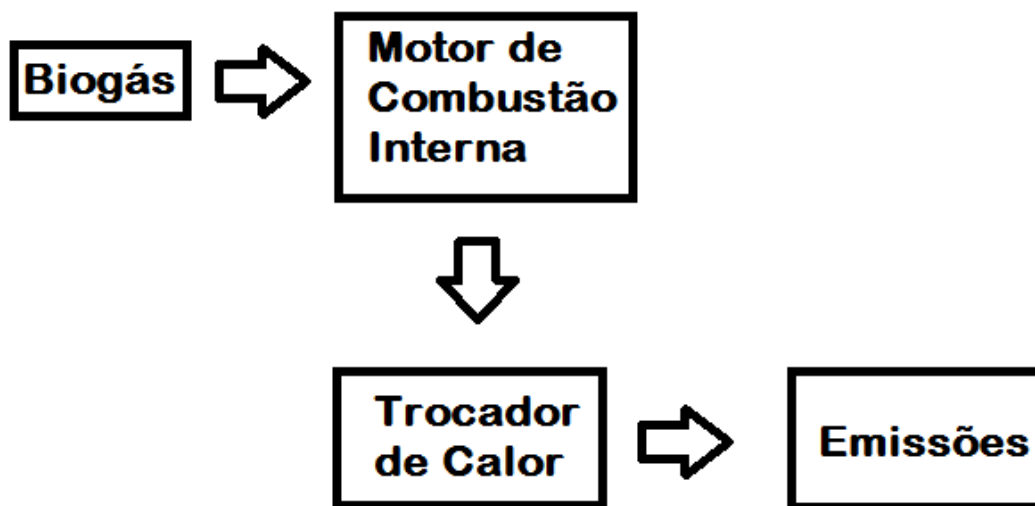
P_{ele} Potência elétrica gerada [kW].

Deste cálculo, obtém-se uma eficiência de 20,7 %.

CAPÍTULO 3 – EFICIÊNCIA ECOLÓGICA

O biogás, desde sua admissão no motor de combustão interna até os gases de exaustão após sua queima, segue o seguinte fluxo, ilustrado na Figura 9.

Figura 9: Queima do biogás no motor de combustão interna



Fonte: Elaboração própria

Biogás com ar é alimentado no motor de combustão interna, onde ocorre a combustão. Os gases de exaustão provenientes dessa combustão passam pelo trocador de calor e são lançados no ambiente.

A Tabela 19 apresenta as emissões de alguns motores comumente utilizados em ciclos de cogeração operando a biogás.

Tabela 19: Emissões de alguns modelos de motores

Marca e Modelo do Motor	Bergen	Caterpillar 3500	Caterpillar 3600	Jenbacher 300	Jenbacher 600	MAN	MAN /B&W	MWM 604	Niigata 26	Waukesha	Wärtsilä 25	Wärtsilä 34	Wärtsilä 28
Tipo de Ignição (Pré-câmara ou câmara aberta)	Pre-	Pre-	Aberto	Aberto	Pre-	Aberto	Pre-	Aberto	Pre-	Aberto	Pre-	Pre-	Pre-
Eficiência [%]	39,4	36,3	39,2	38,4	38,8	33,1	38,0	35,1	38,0	33,3	37,2	41,2	41,1
NOx [g/GJ]	232	137	91	169	169	125	142	169	93	74	157	121	130
UHC (C) [g/GJ]	648	434	611	235	516	74	781	161	891	608	479	413	473
CH4 [g/GJ]	694	465	655	251	553	79	837	173	955	651	514	442	507
NMVOC [g/GJ]	156	104	147	56	124	18	188	39	214	146	115	99	114
CO [g/GJ]	225	110	145	129	222	165	80	177	122	216	248	163	265
Odor (escapamento) [OU/m ³]	13996	2241	5338	8679	500	5095	400	10253	2945	4600	10083	8028	11702
Aldeído													
- Formaldeído [mg/GJ]	35,22	10,93	24,85	18,67	0,72		0,22	19,86	25,35	32,80	18,55	37,22	
- Acetaldeído [mg/GJ]	3,05	0,63	2,15	1,08	0,00		0,00	1,57	2,99	1,68	1,53	2,28	
- Acroleína [mg/GJ]	0,15	0,05	0,04	0,14	0,00		0,00	0,03	0,03	0,16	0,06	0,03	
- Propanal [mg/GJ]	0,31	0,04	0,18	0,10	0,00		0,00	0,13	0,22	0,12	0,16	0,17	
- Acetona [mg/GJ]	0,32	0,08	0,28	0,14	0,00		0,00	0,38	0,37	0,06	0,19	0,37	
- Butanal [mg/GJ]	0,15	0,03	0,06	0,05	0,00		0,00	0,05	0,31	0,16	0,06	0,17	
- Pentanal [mg/GJ]	0,15	0,08	0,29	0,04	0,00		0,00	0,35	0,00	0,00	0,00	0,30	
- Hexanal [mg/GJ]	0,02	0,00	0,07	0,00	0,00		0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	
- Benzaldeído [mg/GJ]	0,04	0,02	0,00	0,03	0,00		0,00	0,04	0,06	0,00	0,00	0,06	
Custo anual combustível consumido [TJ]	8841	4185	4287	5124	550	834	614	662	1115	838	838	2130	809

Fonte: Kristensen et al., 2004

Como pode ser visto na Tabela 19, existem grandes diferenças nos fatores de emissão específicos conforme a marca e o modelo do motor. Segundo Kristensen *et al.* (2004) deve-se sempre utilizar fatores de emissão específicos para a marca e o modelo do motor sempre que for possível para obter maior precisão nas emissões agregadas ao motor.

A Tabela 20 apresenta um comparativo de emissões de um motor operando a gás natural e outro com biogás, ambos com aproximadamente 2 MW de potência (KRISTENSEN *et al.*, 2004).

Tabela 20: Comparativo de emissões de poluentes

Emissão	Unidade	Motor a gás natural	Motor a Biogás
NO _x	g/GJ	168	540
Hidrocarboneto não queimado	g/GJ	485	254
CH ₄	g/GJ	520	323
CO	g/GJ	175	>273
N ₂ O	g/GJ	1,3	0,5
Material Particulado Total	g/GJ	0,76	2,63
PM10	mg/GJ	189	451
PM2,5	mg/GJ	161	206
PM1	mg/GJ	143	132
SO ₂	g/GJ	x	19
Odor (escapamento)	OU/m ³	8229	18516
1,3-butadieno	g/GJ	<0,047	<0,02

Fonte: Kristensen *et al.*, 2004

Conforme mostra a Tabela 20, as emissões de NO_x, CO e material particulado são bem maiores para o motor operando a biogás quando comparado ao motor operando com gás natural.

Villela e Silveira (2007), baseando-se no proposto por Cardu e Baica (1999), propõe um indicador de poluição, Π_g , calculado pela Equação (3.1), a partir do carbono equivalente, possibilita o cálculo da eficiência ecológica. A eficiência ecológica varia entre 0 e 1, onde 0 é um sistema muito poluidor e 1 é um sistema ideal.

$$\Pi_g = \frac{(CO_2)_e}{PCI_{biogás}} \quad (3.1)$$

Onde:

$(CO_2)_e$ Dióxido de carbono equivalente [kg CO₂/kg comb];

$PCI_{biogás}$ Poder calorífico inferior do biogás [kJ/kg];

Π_g Indicador de poluição [kg CO₂/MJ].

Para o cálculo do (CO₂)_e do biogás pode-se utilizar a Equação (3.2), para combustíveis gasosos (VILELLA e SILVEIRA, 2007).

$$(CO_2)_e = CO_2 + 80(SO_2) + 50(NO_x) + 67(MP) \quad (3.2)$$

Onde:

$(SO_2)_e$ Dióxido de enxofre equivalente no (CO_2) ;

$(NO_x)_e$ Dióxido de nitrogênio equivalente no (CO_2) ;

$(MP)_e$ Material particulado equivalente no (CO_2) .

3.1.1 Análise de emissões da queima de biogás

Para a queima do biogás deve-se quantificar as emissões de CO_2 , NO_x e de SO_x .

a.) Estimativa da quantidade de NO_x nos gases de escape:

As emissões de NO_x do biogás baseia-se na Equação (3.3), proposta por Villela e Silveira (2007):

$$NO_X = \frac{\left[\frac{2270.22,4 \times 10^{-3}}{10^6} \right]}{M_{comb} \cdot 10^{-3}} \quad (3.3)$$

Onde:

M_{comb} Massa molar do combustível [kg/kmol].

A massa molar do biogás para a composição adotada para essa tese é de 23,85 g/mol. Substituindo-a na Equação (3.3), tem-se uma emissão de NO_x por mol de combustível de 0,0020 gramas.

b.) Estimativa da quantidade de SO₂ dos gases de escape:

De acordo com a Swedish Gas Technology Center (2012) e Mkoma e Mabiki (2011), a quantidade de H₂S no biogás sem filtro é estimada em 500 ppmV. Um processo de filtragem é necessário para remover 99 % do H₂S do combustível, pois esse H₂S é altamente prejudicial para o funcionamento do motor. Considerando as massas molares de H₂S (34,08 g/mol) e de biogás (25,38 g/mol) resulta em 6,7.10⁻⁶ kg H₂S/kg Biogás, obtido pela Equação (3.4)(KUNTE, 2015).

$$(SO_2) = n_{H_2S} \cdot \frac{M_{SO_2}}{M_{H_2S}} \quad (3.4)$$

Onde:

n_{H_2S} Massa de H₂S no combustível por massa de combustível [kg_{H2S}/kg_{comb}];

M_{SO_2} Massa molar do SO₂ [g/mol];

M_{H_2S} Massa molar do H₂S [g/mol].

c.) Cálculo da razão de massa de CO₂ nos gases de escape por massa de combustível, Equação (3.5) (XAVIER, 2016).

$$(CO_2) = \frac{w_{CO_2} \cdot M_{CO_2}}{M_{comb}} \quad (3.5)$$

Onde:

M_{comb} Massa molar do combustível [g/mol];

M_{CO_2} Massa molar do CO₂ [44,01 g/mol];

w_{CO_2} Mol de CO₂ nos gases da queima do biogás por mol de

combustível [mol/mol].

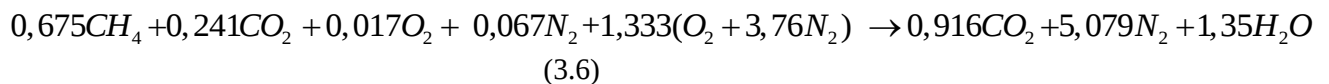
Da Equação (3.5), resulta uma emissão de 0,59 gramas de CO₂ por mol de combustível.

3.1.2 Cálculos da eficiência ecológica do sistema de cogeração

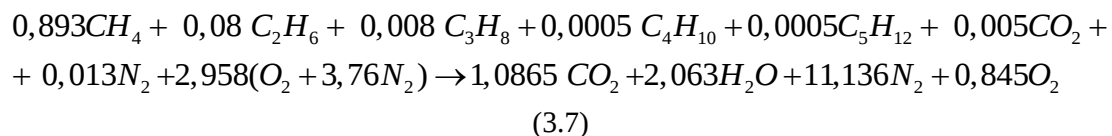
Para a análise da eficiência ecológica comparou-se o biogás com o gás natural, uma vez que esses combustíveis possuem uma composição química similar. Nesse ciclo de cogeração tem-se apenas a queima de biogás no motor, portanto toda a poluição do sistema é proveniente dessa queima.

Segundo Coronado (2009) para a combustão em motor de combustão interna é adequado adotar um excesso de ar de 40 %, portanto, Equações (3.6) e (3.7).

Biogás:



Gás natural:



A eficiência ecológica, Equação (3.8) mostra o quão poluidor é um processo produtivo, considerando as emissões por combustível ou energia elétrica utilizada. O resultado da eficiência deve se encontrar entre “0” e “1”. Sendo que “0” representa altamente poluidor e “1” sem impactos ambientais (VILLELA e SILVEIRA, 2007):

$$\varepsilon = \left(\frac{0,204 \cdot \eta_g}{\eta_g + \Pi_g} \cdot \ln(135 - \Pi_g) \right)^{0,5} \quad (3.8)$$

Onde:

- ε Eficiência ecológica do sistema de cogeração [-];
- η_g Rendimento global do sistema de cogeração [-];
- Π_g Indicador de poluição [kg/MJ].

A eficiência ecológica é diretamente proporcional à eficiência da planta e inversamente proporcional ao indicador de poluição. Conforme já mostrado na Equação (3.8), o enxofre puro tem maior impacto ambiental e, desse modo, tem uma eficiência ecológica igual à zero. Já a combustão de hidrogênio puro, sem considerar o processo de produção de hidrogênio, tem uma eficiência ecológica de 1 (VILLELA e SILVEIRA, 2007). Alguns valores de referência de eficiência ecológica são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Referências de eficiências ecológicas

Combustíveis	Π_g (kg/MJ)	ε
Hidrogênio	0	1
Enxofre	134	0
Outros	1-134	0-1

Fonte: Villela e Silveira, 2007

Substituindo-se os valores do CO_2 , NO_x e SO_x na Equação (3.2) e o valor do Π_g na Equação (3.8), pode-se calcular o indicador de poluição e a eficiência ecológica do biogás e do gás natural, apresentados na Tabela 22:

Tabela 22: Resultados da análise ecológica do biogás e do gás natural

Combustível	ε
Biogás	0,89
Gás Natural*	0,85

Fonte: Elaboração própria; * Xavier, 2016

CAPÍTULO 4 – DESENVOLVIMENTO DE MODELO EXERGEOCONÔMICO-AMBIENTAL

Em um cenário onde o custo das emissões de poluentes é relevante, por exemplo, em uma situação onde há o comércio de créditos de carbono, torna-se interessante conhecer e entender como esse custo pode influenciar no custo dos produtos finais de um sistema e no custo de manufatura exergético.

Dois métodos, denominados de Método 1 e Método 2, são analisados. No Método 1, será aplicado o método proposto por Silveira e Tuna, (2004) e no Método 2 o método proposto por Silveira e Tuna, (2003). Ambos os métodos foram adaptados para que passem a computar o custo das emissões de CO₂.

Cada unidade do ciclo de cogeração será responsável pela emissão de uma determinada quantidade do CO₂ total emitido na queima do combustível. Para a divisão do CO₂ emitido, para o Método 1 o CO₂ emitido em cada unidade será repartido levando em conta a irreversibilidade de cada unidade, ou seja, cada unidade será responsável por uma parcela da irreversibilidade total do ciclo. No Método 2, a emissão de CO₂ será repartida baseando-se no método do incremento exergético.

O intuito do método exergoeconômico-ambiental desenvolvido nessa tese é ser universal, ou seja, deve ser possível aplicá-lo a qualquer tipo de MCI operando com biogás. Dessa forma, torna-se necessário modificar o ciclo termodinâmico inicialmente proposto e incluir nesse a água de refrigeração do motor caso ela esteja disponível. Como o motor inicialmente estudado possui refrigeração a ar, outros motores com refrigeração a água foram incluídos na análise para efeito de comparação e aplicação do método. Os dados para os motores analisados constam na Tabela 23.

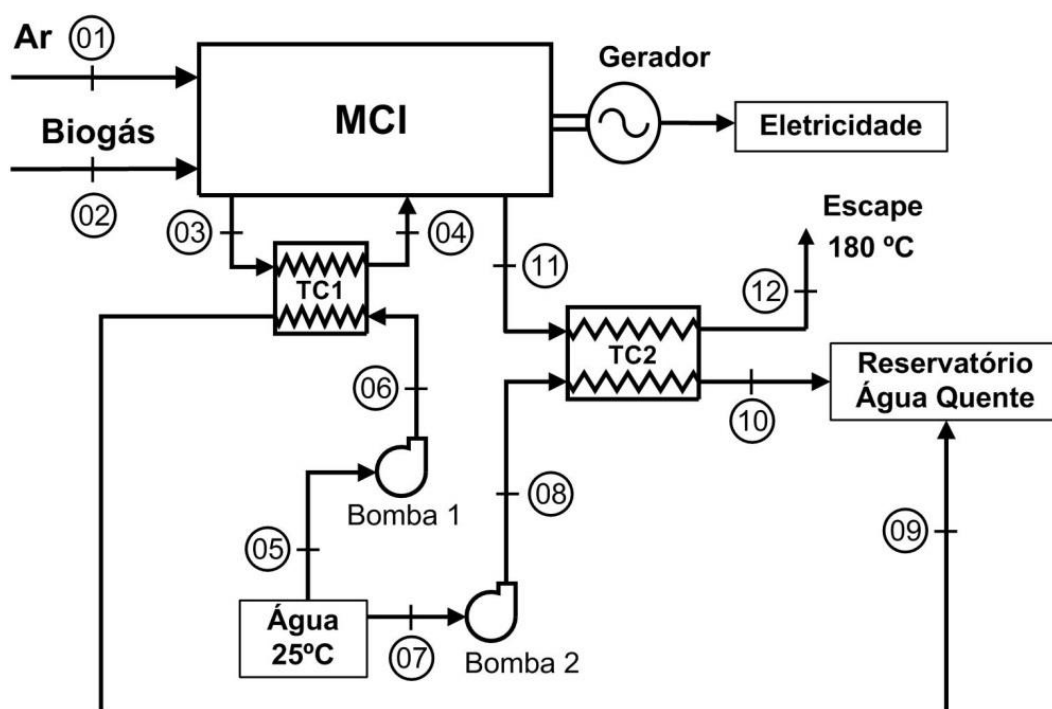
Tabela 23: Dados dos motores para a análise exergo-economica-ambiental

Marca	BRANCO	QUANTUM	PERKINS	MWM
Modelo	BT-5000 Bio 4 KWe *	Q3.3 TSI 27,5 kWe **	4008-30 TRS2 506 kWe **	TCG 2020 V20 2000 kWe **
P _{ELE_NOMINAL} [kW _e]	4,0	27,5	506,0	2000,0
P _{ELE} [kW]	4,0	27,5	505,9	1999,5
P _{term} [kW]	-	41,6	594,0	2154,0
T _{Água Jaqueta (ent)} [°C]	0	67,0	67,0	67,0
T _{Água Jaqueta (saida)} [°C]	0	85,0	85,0	85,0
T _{Exaustão} [°C]	450,0	450,0	450,0	450,0

Fonte: *Faria, 2014; **EPS System, 2016

O ciclo termodinâmico considerado para o restante dessa tese é apresentado na Figura 10 e na Tabela 24.

Figura 10: Ciclo de cogeração considerando a água da jaqueta



Fonte: Elaboração própria

Onde:

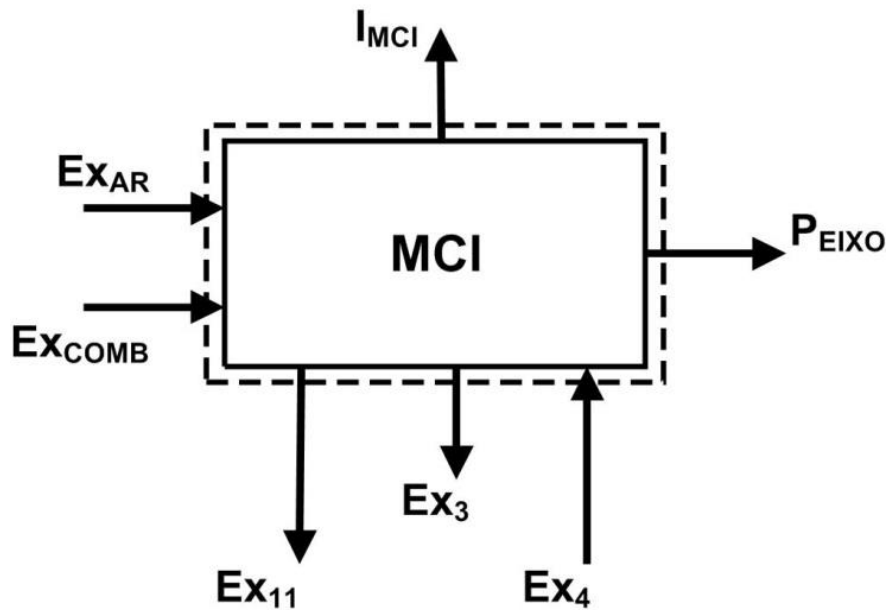
Tabela 24: Descrição de pontos específicos do ciclo de cogeração da Figura 10

Ponto	Descrição
1	Entrada de ar
2	Entrada de combustível
3	Entrada de água da jaqueta no trocador de calor 1
4	Retorno de água do trocador de calor para o MCI
5	Entrada de água fria na bomba 1
6	Entrada de água fria no trocador de calor 1
7	Entrada de água na bomba 2
8	Entrada de água fria no trocador de calor 2
9	Saída de água quente do trocador de calor 1
10	Saída de água quente do trocador de calor 2
11	Entrada dos gases de exaustão no trocador de calor 2
12	Saída dos gases de escapamento do trocador de calor 2

O biogás alimenta, juntamente com ar, o MCI que está acoplado ao gerador elétrico. O gerador converte potência de eixo do motor em potência elétrica. Um trocador de calor (TC 2) permite a recuperação de calor dos gases de exaustão do MCI para a produção de água quente como subproduto. As bombas fornecem o fluxo de água fria do reservatório para os trocadores de calor. A água da jaqueta, quando presente, passa pelo trocador de calor 1, aquecendo a água proveniente da bomba 1. Para o caso do motor Branco, que é refrigerado a ar, o trocador de calor 1 não é levado em conta.

Com a adição do segundo trocador de calor, também é necessário refazer a análise exergética do MCI. O volume de controle do MCI com os fluxos do segundo trocador de calor são apresentados pela Figura 11.

Figura 11: Volume de controle no MCI com o segundo trocador de calor



Fonte: Elaboração própria

Onde:

$E_{x\text{ ar}}$	Fluxo exergético do ar a 25 °C;
$E_{x\text{ comb}}$	Fluxo exergético do combustível;
EX_3	Fluxo exergético da água quente proveniente do motor;
EX_4	Fluxo exergético da água quente que retorna ao motor;
EX_{11}	Fluxo exergético dos gases de exaustão a 450 °C;
I_{MCI}	Irreversibilidade no motor.

O volume de controle no MCI difere do apresentado anteriormente na Figura 11 pela adição dos fluxos exergéticos da água da jaqueta e da água que retorna para o motor (EX_3 e EX_4 , respectivamente).

Desse modo, a formulação da análise exergética do motor é dada pela Equação (4.1):

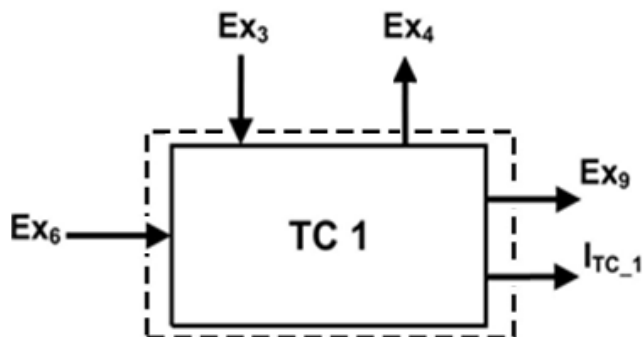
$$\dot{E}x_{AR} + \dot{E}x_{COMB} + \dot{E}x_4 = \dot{E}x_{11} + \dot{E}x_3 + P_{ELE} + \dot{I}_{MCI} \quad (4.1)$$

Onde:

- $\dot{E}x_{ar}$ Fluxo exergético do ar a 25 °C [kW];
- $\dot{E}x_{comb}$ Fluxo exergético do combustível [kW];
- $\dot{E}x_3$ Fluxo exergético da água quente proveniente do motor [kW];
- $\dot{E}x_4$ Fluxo exergético da água quente que retorna ao motor [kW];
- P_{ele} Potência elétrica produzida [kW];
- $\dot{I}_{MCI}$ Irreversibilidade no motor [kW].

Já o trocador de calor da água da jaqueta é representado na Figura 12.

Figura 12: Volume de controle no trocador de calor da água da jaqueta



Fonte: Elaboração própria

Onde:

Ex_3 Fluxo exergético da água quente proveniente do motor;

Ex_4 Fluxo exergético da água quente que retorna ao motor;

Ex_6 Fluxo exergético da água fria na entrada do trocador de calor;

Ex_9 Fluxo exergético da água quente na saída do trocador de calor;

I_{TC_1} Irreversibilidade no trocador de calor 1.

Água fria (Ex_6) e água quente da jaqueta do motor (Ex_3) entram no trocador de calor, saindo água quente e a água que retorna para o motor.

Para o trocador de calor da água de jaqueta, em base exergética, tem-se, Equação (4.2).

$$\dot{E} x_6 + \dot{E} x_3 = \dot{E} x_4 + \dot{E} x_9 + \dot{I}_{TC_1} \quad (4.2)$$

Onde:

$\dot{E} x_3$ Fluxo exergético da água quente proveniente do motor [kW];

$\dot{E} x_4$ Fluxo exergético da água quente que retorna ao motor [kW];

$\dot{E} x_6$ Fluxo exergético da água fria na entrada do trocador de calor [kW];

$\dot{E} x_9$ Fluxo exergético da água quente na saída do trocador de calor [kW];

$\dot{I}_{TC_1}$ Irreversibilidade no trocador de calor 1 [kW].

4.1.2 Determinação do Custo do Biogás

Determinar o custo do biogás depende fortemente da forma como o biogás é obtido. No caso de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto o biogás é um produto da decomposição natural da matéria orgânica e deve ser neutralizado apropriadamente. É comum se encontrar em aterros sanitários queimadores, onde o biogás é continuamente queimado. Nesses casos, o biogás já existe e não tem um custo direto. Para o caso do aproveitamento desse biogás em um motor de combustão interna, por exemplo, seu custo estaria diretamente ligado ao custo da purificação e da manutenção dos filtros para sua utilização (KUNTE, 2015).

Pode-se citar também o custo de armazenamento do biogás, pois dificilmente é produzida uma quantidade suficiente e capaz de alimentar o motor diretamente.

De acordo com Brizi *et al.* (2014), a relação preço do gás natural para o biogás é estimado em 3,25, ou seja, o preço do biogás é 3,25 vezes menor que o do gás natural, mas como o consumo do motor estudado já é para o biogás, essa relação não pode ser utilizada já que não se tem o consumo do motor para o gás natural.

Xavier (2016) obtivera em seu estudo um valor de 0,019 US\$/kWh para o biogás e esse será o valor adotado para esse estudo.

O valor médio da tonelada do carbono adotada para os cálculos de custo é apresentado na Tabela 25.

Tabela 25: Estimativa de custo médio da tonelada de carbono

Ano	Média [US\$]
2010	10
2015	11
2020	12
2025	14
2030	16
2035	18
2040	21
2045	23
2050	26

Fonte: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis, 2016

4.1.3 Equação do custo de manufatura exergetico (CMex):

O custo de manufatura exergetico, Equação (4.3), considera o custo total dos produtos do ciclo, nesse caso, o custo da energia elétrica gerada e o custo da água quente. Esta equação será a mesma para ambos os métodos estudados.

$$CMex = c_{ELE} \cdot P_{ELE} + c_{AQ_1} \cdot \dot{E} x_9 + c_{AQ_2} \cdot \dot{E} x_{10} \quad (4.3)$$

Onde:

CMex Custo de manufatura exergetico [US\$/h];

C_{ele}	Custo específico da eletricidade produzida [US\$/kWh];
C_{AQ_1}	Custo específico da água quente produzida [US\$/kWh];
C_{AQ_2}	Potência elétrica [kW];
$\dot{E}_{x_{AQ_1}}$	Exergia água quente proveniente do trocador de calor 1 [kW];
$\dot{E}_{x_{AQ_2}}$	Exergia água quente proveniente do trocador de calor 1 [kW];
P_{ele}	Potência elétrica produzida [kW].

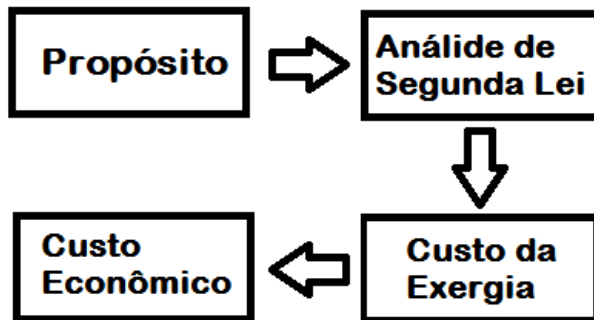
4.2.1 Método 1

De acordo com Valero *et al.* (2006), uma análise exérgica localiza e quantifica irreversibilidades em um processo. A entidade física que liga a termodinâmica e a economia é a geração de entropia ou, mais especificamente, a irreversibilidade. Ela representa a energia "útil" perdida ou destruída, em todos os processos físicos, e tem sido usada para identificar as verdadeiras ineficiências dos processos industriais. Uma vez que todos os processos comuns em uma planta real não são reversíveis, a exergia é destruída e alguns recursos naturais são consumidos e perdidos para sempre, o que envolve um custo em termos econômicos.

Quanto mais irreversível for um processo, mais recursos naturais serão consumidos por ele. O balanço exérgico é responsável pela degradação da exergia. O objetivo de um processo é definido por meio da definição de sua eficiência. Isto quer dizer que há uma classificação implícita dos fluxos que cruzam a fronteira do sistema: os fluxos que são o objetivo de produção, os recursos necessários para realizar a produção e os que são residuais. Esta

informação não está implícita na segunda lei e é o ponto conceitual mais importante que separa e, ao mesmo tempo, une a física à economia. Deste modo, uma cadeia lógica de conceitos pode ser estabelecida, de acordo com a Figura 13 (VALERO *et al.*, 2006).

Figura 13: Cadeia lógica do conceito exergoeconômico



Fonte: Adapada de Valero *et. al*, 2006

A análise do Método 1 considera o ciclo de cogeração da Figura 10. Inicialmente são calculados os custos dos produtos do sistema e posteriormente o custo de manufatura exergético, baseando-se no método proposto por Silveira e Tuna, (2003).

4.2.2 Custo específico da produção de energia elétrica pelo método 1

O custo específico da energia elétrica produzida para o Método 1 pode ser dividido em quatro partes, sendo uma parcela referente ao custo de investimento para o sistema de geração elétrica, uma parcela referente ao custo da manutenção desse sistema, o custo de operação e também uma parcela referente ao custo da poluição para essa operação, conforme a Equação (4.4).

$$C_{ELE} = \frac{Inv_{MOTOR/GERADOR} \cdot f \cdot \phi}{H \cdot P_{ELE}} + \frac{c_{comb} \cdot FP_{ELE} \cdot \dot{E}_{COMB}}{P_{ELE}} + \frac{c_{CO_2} \cdot FP_{ELE} \cdot \dot{m}_{CO_2}}{P_{ELE}} \quad (4.4)$$

Onde:

C_{ele}	Custo específico da energia elétrica produzida [US\$/kWh];
c_{co2}	Preço da tonelada de CO ₂ [US\$/t];
C_{comb}	Preço do combustível [US \$/kWh];
FP_{ele}	Fator de produção de energia elétrica [-];
P_{ele}	Potência elétrica produzida [kW];
f	Fator de anuidade [1/ano];
H	Período de operação da planta [h/ano];
$Inv_{MOTOR/GERADOR}$	Investimento no conjunto motor-gerador [US\$];
ϕ	Fator de manutenção [-];
$\dot{E}_{x\ comb}$	Fluxo exergético do combustível [kW];
$\dot{m}_{CO_2}$	Fluxo de CO ₂ nos gases de escapamento [t/h].

O investimento no motor-gerador, segundo Boehm, (1987) é dado pela Equação (4.5) e o fator de manutenção adotado para a produção de energia elétrica é de 10 % do valor do investimento (SILVEIRA e TUNA, 2004).

$$Inv_{MOTOR/GERADOR} = C_r \left(\frac{S}{S_r} \right)^m \quad (4.5)$$

Onde:

C_r	Custo do equipamento de referência [US\$];
S_r	Capacidade do equipamento de referência [kW];
S	Capacidade do equipamento [kW];
m	Inclinação da reta [-].

Os valores dos parâmetros C_r , S_r e m , para conjuntos motor-gerador são apresentados na Tabela 26 em função da potência elétrica produzida.

Tabela 26: Parâmetros para o cálculo do investimento no conjunto motor-gerador

Potência Elétrica [kW]	m	$C_r (x 10^3)$ [US\$]	S_r [kW]
2 - 10	0,788	3,65	6,0
10 - 600	0,904	285,00	273,4
600 - 5000	1,161	2900,00	3095,0

Fonte: Elaboração própria

Os parâmetros da Tabela 26 foram obtidos levando-se em conta os custos de investimento da Tabela 27.

Tabela 27: Investimento no conjunto motor-gerador

Potência Elétrica [kW]	Investimento [US\$]
2	450,00 ¹
10	6750,00 ²
600	540000,00 ³
5000	5650000,00 ⁴

Fonte: 1: Wresta et al., 2015; 2: Khan et al., 2014; 3: Krich et al. 2005; 4: Topic et al., 2010

4.2.3 Custo específico da produção de água quente pelo método 1

O custo exergético da água quente é dividido em duas partes: produção de água quente pelo calor recuperado da água de refrigeração da jaqueta e dos gases de exaustão.

- Custo específico da produção de água quente pela água da jaqueta:

Do mesmo modo que o custo específico da energia elétrica, o custo da água quente do trocador de calor 1 é dividido em quatro parcelas, conforme a Equação (4.6).

$$c_{AQ_1} = \frac{Inv_{BOMBA_1/TC_1} \cdot f \cdot \phi}{H \cdot Ex_9} + \frac{c_{COMB} \cdot FP_{AQ_1} \cdot \dot{E} x_{COMB}}{Ex_9} + \frac{c_{CO_2} \cdot FP_{AQ_1} \cdot \dot{m}_{CO_2}}{Ex_9} \quad (4.6)$$

Onde:

Inv_{BOMBA_1/TC_1}	Investimento no trocadores de calor 1 e bomba 1 [US\$];
f	Fator de anuidade [1/ano];
H	Período de operação da planta [h/ano];
ϕ	Fator de manutenção [-];
c_{CO_2}	Preço da tonelada de CO ₂ [US\$/t];
c_{comb}	Preço do combustível [US \$/kWh];
FP_{AQ_1}	Fator de água quente 1 [-];
$\dot{m}_{CO_2}$	Fluxo de CO ₂ nos gases de escapamento [t/h];

$\dot{E}_{x\text{ comb}}$	Fluxo exergético do combustível [kW];
$\dot{E}_{x9}$	Fluxo exergético da água quente do trocador de calor 1 [kW].

- Custo específico da produção de água quente pelos gases de exaustão:

Já o custo específico da água quente proveniente do trocador de calor 2 é dada pela Equação (4.7).

$$c_{AQ_2} = \frac{Inv_{BOMBA_2/TC_2} \cdot f \cdot \phi}{H \cdot Ex_{10}} + \frac{c_{COMB} \cdot FP_{AQ_2} \cdot \dot{E}_{xCOMB}}{Ex_{10}} + \frac{c_{CO_2} \cdot FP_{AQ_2} \cdot \dot{m}_{CO_2}}{Ex_{10}} \quad (4.7)$$

Onde:

Inv_{BOMBA_2/TC_2}	Investimento no trocadores de calor 2 e bomba 2 [US\$];
f	Fator de anuidade [1/ano];
H	Período de operação da planta [h/ano];
ϕ	Fator de manutenção [-];
c_{CO_2}	Preço da tonelada de CO ₂ [t/h];
c_{comb}	Preço do combustível [US \$/kWh];
FP_{AQ_2}	Fator de produção de água quente 2 [-];
$\dot{m}_{CO_2}$	Fluxo de CO ₂ nos gases de escapamento [t/h];
$\dot{E}_{x\text{ comb}}$	Fluxo exergético do combustível [kW];

$\dot{E} x_{10}$ Fluxo exergético da água quente do trocador de calor 2 [kW].

4.2.4 Fator de ponderação pela exergia dos produtos

Para a correta distribuição do custo do combustível entre os produtos do sistema, torna-se necessário aplicar um fator de ponderação. Os fatores de ponderação para a energia elétrica e água quente são expressos pelas Equações (4.8), (4.9) e (4.10).

$$FP_{ELE} = \frac{P_{ELE}}{\dot{E} x_9 + \dot{E} x_{10} + P_{ELE}} \quad (4.8)$$

$$FP_{AQ_1} = \frac{\dot{E} x_{AQ_1}}{\dot{E} x_9 + \dot{E} x_{10} + P_{ELE}} \quad (4.9)$$

$$FP_{AQ_2} = \frac{\dot{E} x_{AQ_2}}{\dot{E} x_9 + \dot{E} x_{10} + P_{ELE}} \quad (4.10)$$

4.2.5 Análise pelo método 1

Inicialmente fixando-se a operação anual em 4380 horas (12 horas por dia), um período de retorno de investimento variando entre um e doze anos e uma taxa de juros de 6%, pode-se analisar o custo de manufatura exergético para os

conjuntos avaliados. Primeiramente o custo das emissões não é levado em conta, posteriormente o custo da emissão passa a integrar o custo de manufatura exergético, levando em conta inicialmente as emissões de CO₂ e depois as emissões do (CO₂)_e.

4.2.6 Sem considerar as emissões de CO₂

Avaliando-se os conjuntos sem levar em conta as emissões de CO₂ faz-se necessário para se criar uma base de comparação, Tabela 28.

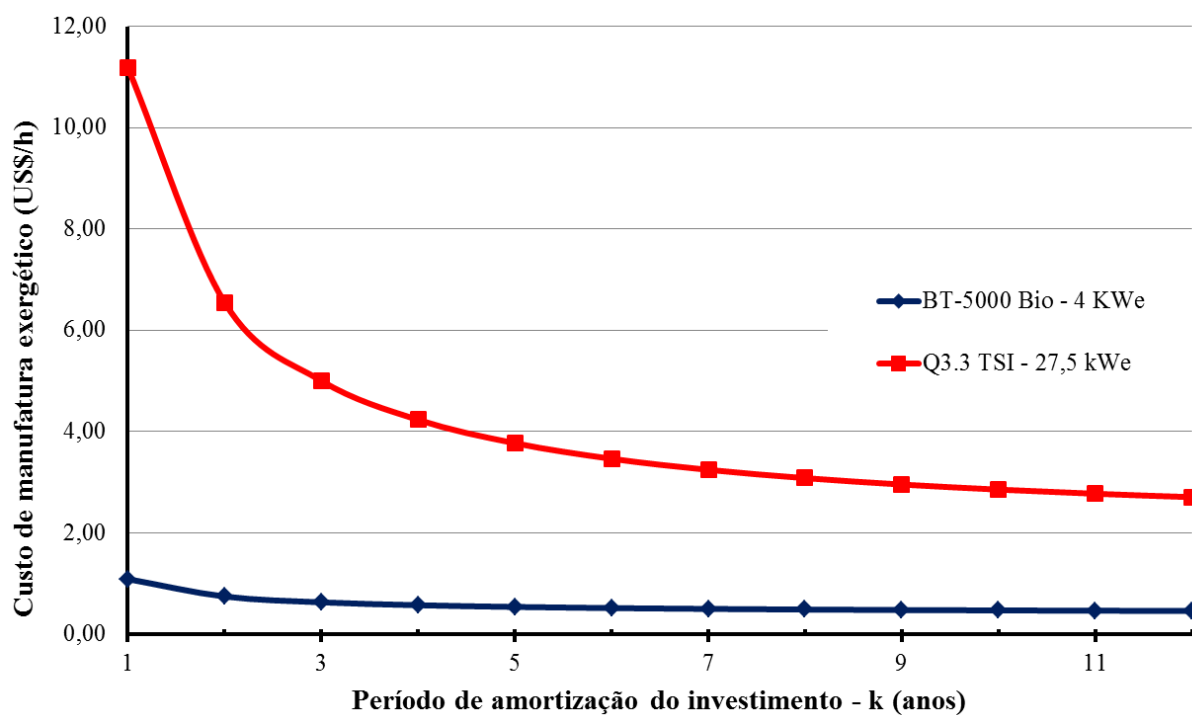
Tabela 28: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização (método 1)

	BRANCO	QUANTUM	PERKINS	MWM
	BT-5000 Bio	Q3.3 TSI	4008-30 TRS2	TCG 2020 V20
k [anos]	4 KWe	27,5 kWe	506 kWe	2000 kWe
1	1,66	10,45	187,69	733,05
2	1,04	6,17	108,99	422,04
3	0,83	4,75	82,78	318,49
4	0,73	4,03	69,70	266,80
5	0,67	3,61	61,87	235,86
6	0,63	3,33	56,66	215,29
7	0,60	3,12	52,96	200,64
8	0,58	2,97	50,19	189,70
9	0,56	2,86	48,05	181,23
10	0,55	2,76	46,34	174,49
11	0,53	2,69	44,95	169,01
12	0,53	2,63	43,80	164,46
r[%]: 6 H[h/ano]: 4380				

Fonte: Elaboração própria

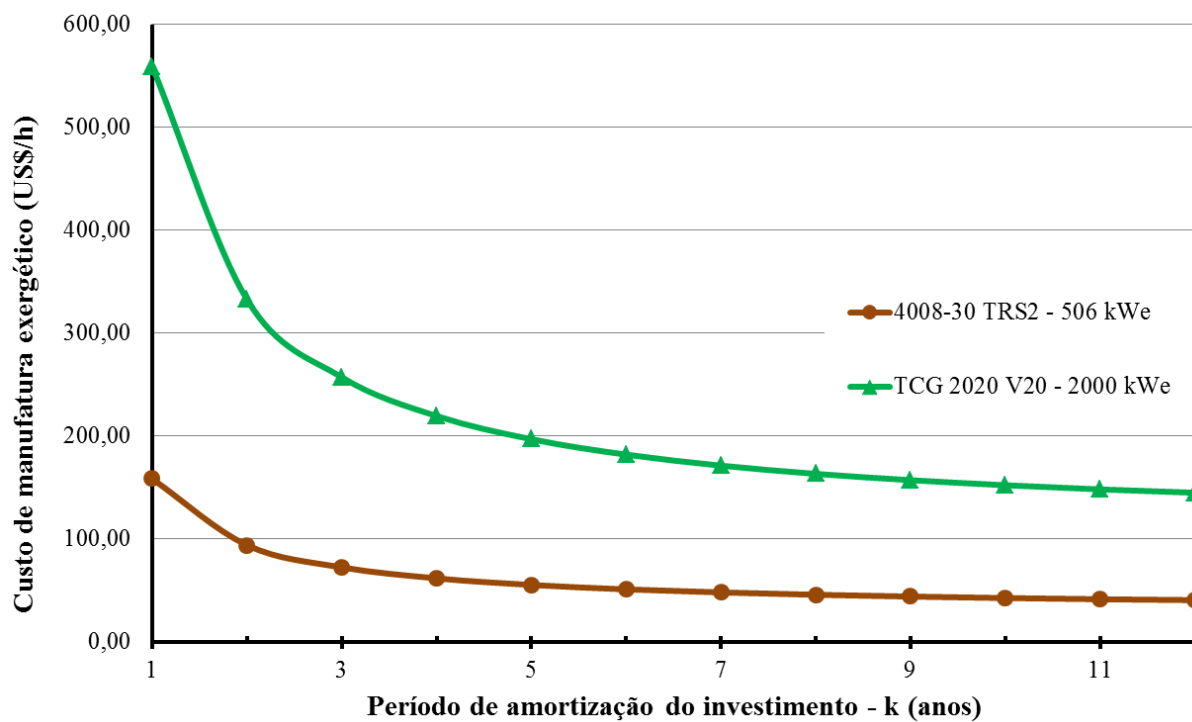
Da Tabela 26 pode-se gerar o gráfico do custo de manufatura exergético em função do período de amortização para os conjuntos avaliados, Figura 14 e 15.

Figura 14: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização (método 1)



Fonte: Elaboração própria

Figura 15: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização (método 1)



Fonte: Elaboração própria

O custo de manufatura exergético para os conjuntos operando a biogás variaram entre 1,66 e 733 US\$/h para o primeiro ano e 0,53 e 164,46 US\$/h para o décimo segundo ano, quando o custo da emissão de CO₂ não é levado em conta.

4.2.7 Considerando-se o custo das emissões de CO₂

Neste cenário se considera o custo da emissão do CO₂ por cada conjunto. Para cada um kg de combustível queimado, são emitidos 1,690 kg de CO₂. Na Tabela 29 são apresentados os custos de manufatura exergético para os conjuntos nesta condição.

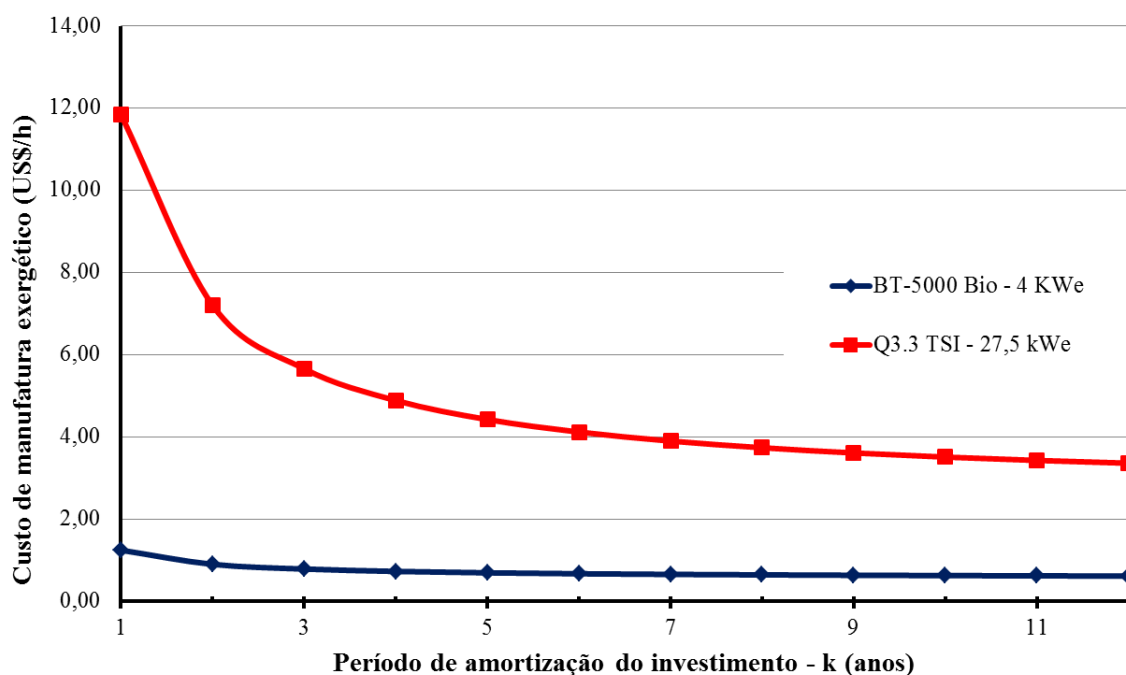
Tabela 29: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização levando em conta as emissões de CO₂ (método 1)

k [ano]	BRANCO BT-5000 Bio 4 KWe	QUANTUM Q3.3 TSI 27,5 kWe	PERKINS 4008-30 TRS2 506 kWe	MWM TCG 2020 V20 2000 kWe
1	1,76	10,89	194,48	757,60
2	1,14	6,61	115,78	446,59
3	0,94	5,18	89,57	343,04
4	0,83	4,47	76,49	291,35
5	0,77	4,04	68,66	260,41
6	0,73	3,76	63,46	239,84
7	0,70	3,56	59,75	225,19
8	0,68	3,41	56,98	214,25
9	0,66	3,29	54,84	205,78
10	0,65	3,20	53,13	199,04
11	0,64	3,12	51,75	193,56
12	0,63	3,06	50,60	189,02
r[%]: 6	H[h/ano]: 4380			

Fonte: Elaboração própria

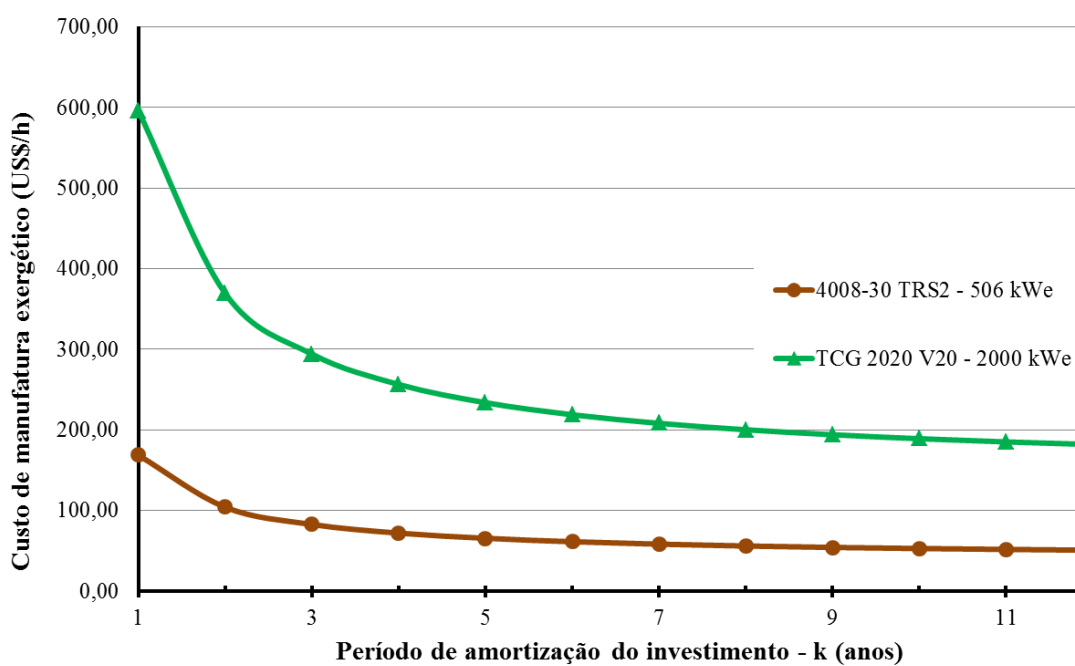
As Figuras 16 e 17, geradas a partir da Tabela 29, demonstram graficamente a variação do custo de manufatura exergético em função do período de amortização.

Figura 16: Custo de manufatura exergetico em função do período de amortização, considerando as emissões de CO₂ (método 1)



Fonte: Elaboração própria

Figura 17: Custo de manufatura exergetico em função do período de amortização, considerando as emissões de CO₂ (método 1)



Fonte: Elaboração própria

Como pode ser observado nas Figuras 15 e 16, o custo de manufatura exergético para este cenário variou entre 1,76 e 757,60 US\$/h no primeiro ano de amortização e 0,63 a 192 US\$/h para o décimo segundo ano. Quando comparado com os valores obtidos para o cenário onde não se considerou o custo das emissões, houve uma sensível elevação no custo de manufatura exergético.

4.2.8 Considerando-se o custo do $(CO_2)_e$

A análise do custo de manufatura exergético tomando por base o $(CO_2)_e$ para o cálculo do fluxo mássico de CO_2 emitido durante a queima do biogás é interessante por ser mais precisa, pois leva em conta reais emissões dos gases na atmosfera. Neste caso, para cada um kg de combustível queimado são emitidos para a atmosfera 1,813 kg de CO_2 . Para esse cenário, os resultados do custo de manufatura exergético são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização levando em conta as emissões de $(CO_2)_e$ (método 1)

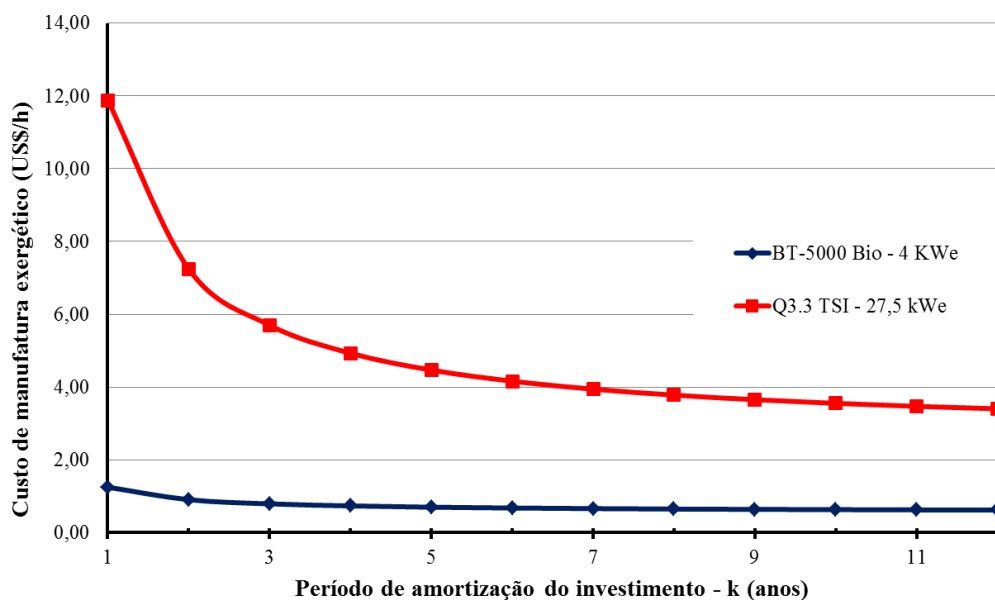
k [ano]	BRANCO BT-5000 Bio 4 KWe	QUANTUM Q3.3 TSI 27,5 kWe	PERKINS 4008-30 TRS2 506 kWe	MWM TCG 2020 V20 2000 kWe
1	1,77	10,92	194,98	759,38
2	1,15	6,64	116,27	448,37
3	0,94	5,21	90,07	344,82
4	0,84	4,50	76,99	293,13
5	0,78	4,07	69,16	262,19
6	0,74	3,79	63,95	241,62
7	0,71	3,59	60,24	226,98
8	0,69	3,44	57,48	216,04
9	0,67	3,32	55,33	207,57
10	0,65	3,23	53,63	200,83
11	0,64	3,15	52,24	195,34
12	0,63	3,09	51,09	190,80

r[%]: 6 H[h/ano]: 4380

Fonte: Elaboração própria

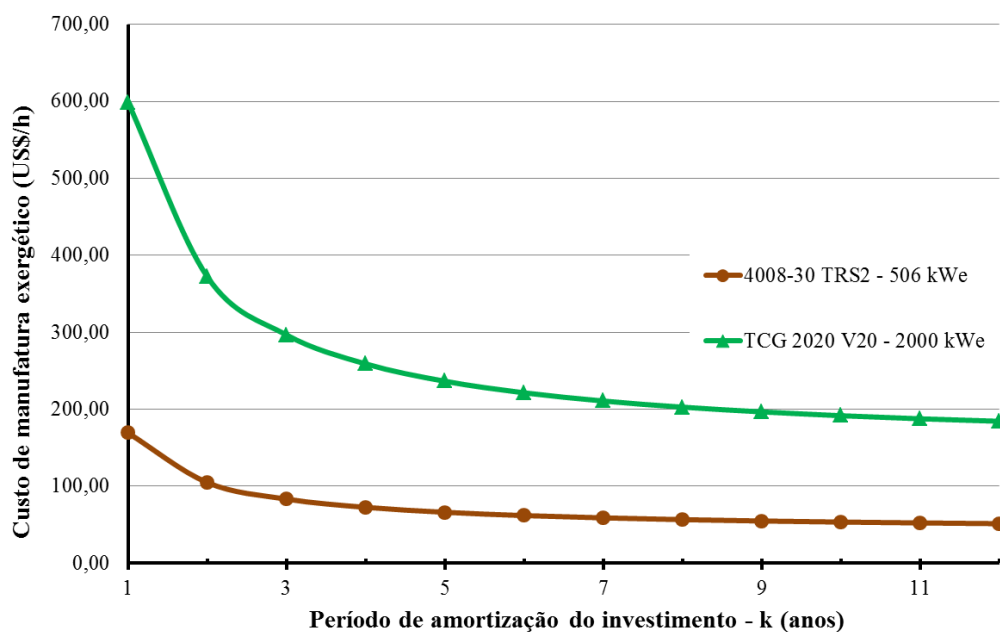
Do mesmo modo que para o anterior, da Tabela 30 onde constam os custos de manufatura exergético considerando-se o custo da emissão de $(CO_2)_e$, tem-se as Figuras 18 e 19.

Figura 18: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização, considerando as emissões de $(CO_2)_e$ (método 1)



Fonte: Elaboração própria

Figura 19: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização, considerando as emissões de $(CO_2)_e$ (método 1)



Fonte: Elaboração própria

Quando comparadas as emissões de CO₂ com as emissões de (CO₂)_e, nota-se uma variação pequena do custo de manufatura exergetico. Tomando-se por base o primeiro ano, para o motor de maior capacidade de geração o custo variou de 757,60 para 759,38 US\$/kWh.

4.2.9 Influência da taxa de juros

Com o recente anúncio de incentivos do governo para projetos de energia renovável, é válido se conhecer a influência da taxa de juros no custo de manufatura exergetico. A Tabela 31 apresenta os valores do custo de manufatura exergetico em função da taxa de juros para o cenário onde considera-se as emissões de (CO₂)_e (maior custo de manufatura exergetico). Foi estabelecido um período de amortização de seis anos por ser o prazo máximo padrão para empréstimos do BNDES (BNDES, 2016) e um período de operação de 12 horas por dia.

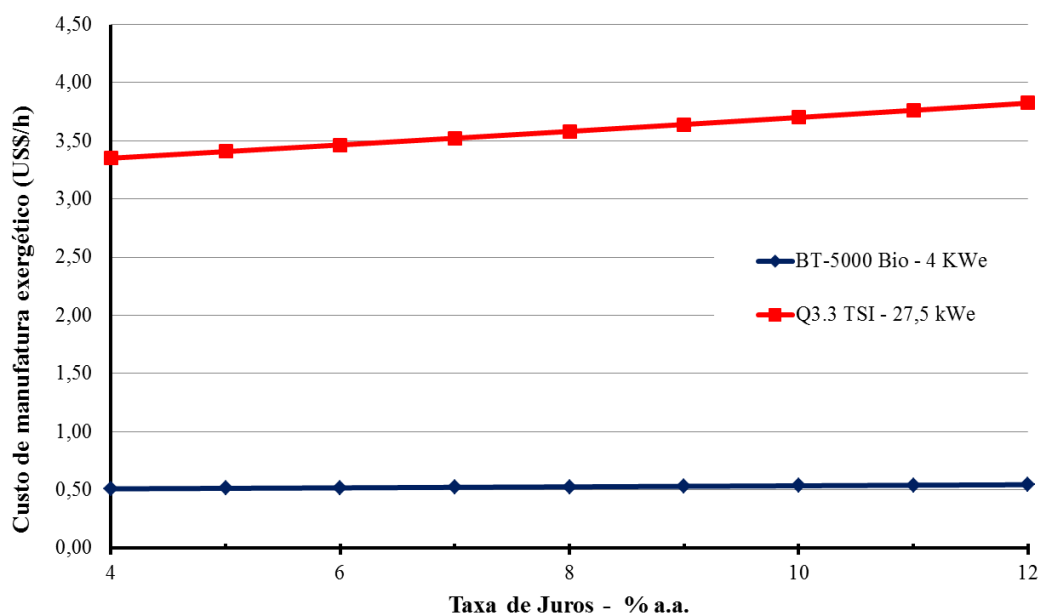
Tabela 31: Custo de manufatura exergetico em função da taxa de juros considerando as emissões de (CO₂)_e (método 1)

r [%]	BRANCO BT-5000 Bio 4 KWe	QUANTUM Q3.3 TSI 27,5 kWe	PERKINS 4008-30 TRS2 506 kWe	MWM TCG 2020 V20 2000 kWe
4	0,72	3,69	62,02	234,00
5	0,73	3,74	62,98	237,79
6	0,74	3,79	63,95	241,62
7	0,74	3,84	64,93	245,51
8	0,75	3,90	65,93	249,45
9	0,76	3,95	66,94	253,44
10	0,77	4,01	67,96	257,48
11	0,78	4,07	69,00	261,57
12	0,78	4,12	70,05	265,71

Fonte: Elaboração própria

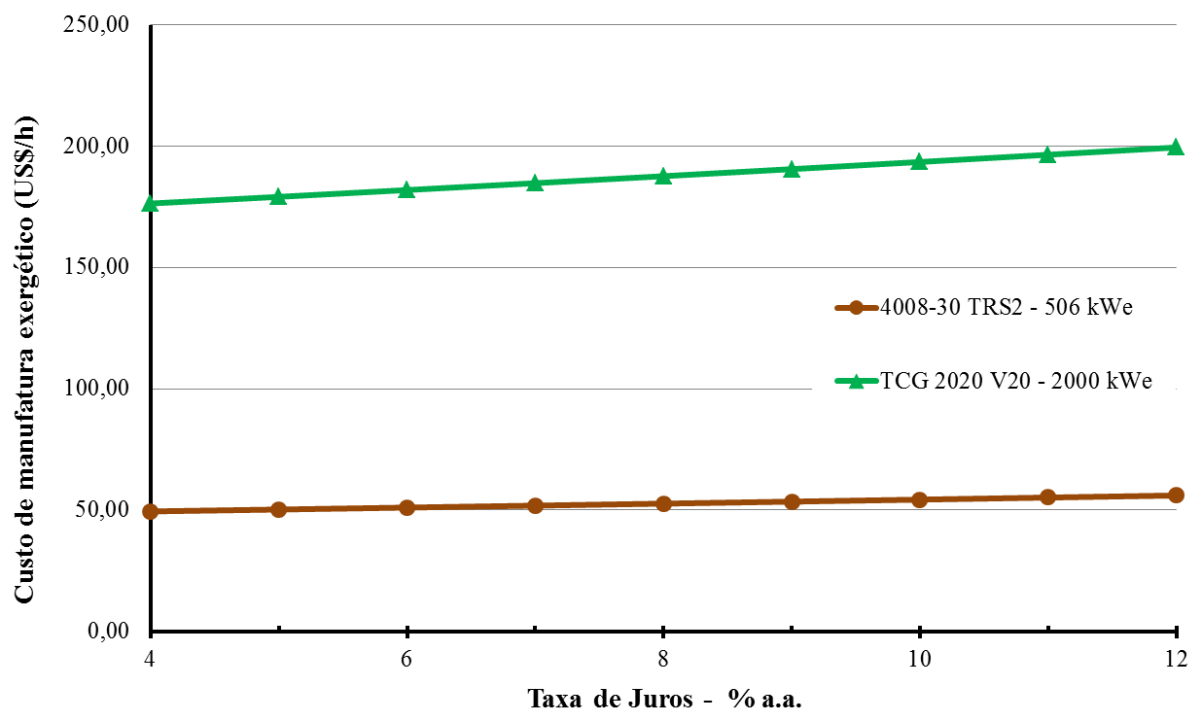
Graficamente, têm-se (Figuras 20 e 21).

Figura 20: Custo de manufatura exergetico em função da taxa de juros (método 1)



Fonte: Elaboração própria

Figura 21: Custo de manufatura exergetico em função da taxa de juros (método 1)



Fonte: Elaboração própria

O custo de manufatura exergético para este caso variou entre 0,72 US\$/h e 234 US\$/h para o menor e o maior conjunto para uma taxa de juros de 4 % e 0,78 US\$/h e 265,71 US\$/h para uma taxa de juros de 12 %.

4.2.10 Influência do preço da tonelada de CO₂

Também é possível analisar a influência da variação do preço da tonelada de carbono no mercado. O custo de manufatura exergético em função da variação do preço é apresentado na Tabela 32.

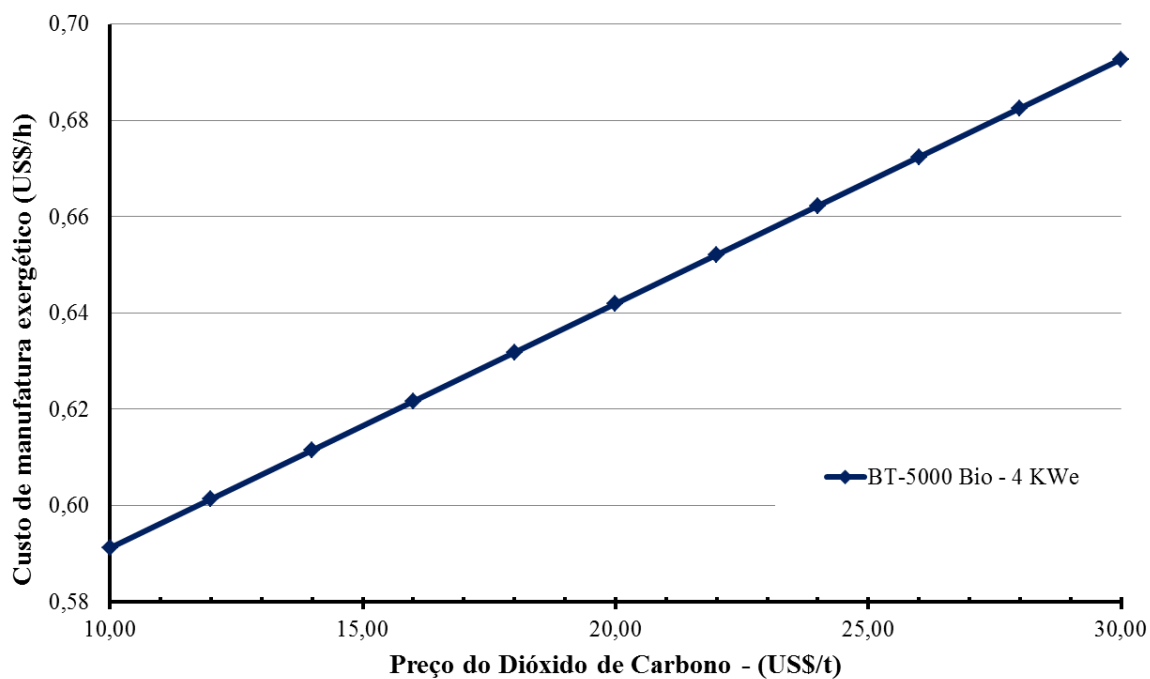
Tabela 32: Custo de manufatura exergético em função do preço da tonelada de CO₂ (método 1)

c _{CO2} [US\$/t]	BRANCO BT-5000 Bio 4 KWe	QUANTUM Q3.3 TSI 27,5 kWe	PERKINS 4008-30 TRS2 506 kWe	MWM TCG 2020 V20 2000 kWe
10,00	0,72	3,83	65,27	248,13
12,00	0,73	3,87	65,95	250,59
14,00	0,74	3,91	66,62	253,04
16,00	0,75	3,96	67,30	255,50
18,00	0,76	4,00	67,98	257,95
20,00	0,77	4,04	68,66	260,41
22,00	0,78	4,09	69,34	262,86
24,00	0,79	4,13	70,02	265,32
26,00	0,80	4,17	70,70	267,77
28,00	0,81	4,22	71,38	270,23
30,00	0,82	4,26	72,06	272,68
r[%]: 6 H[h/ano]: 4380				

Fonte: Elaboração própria

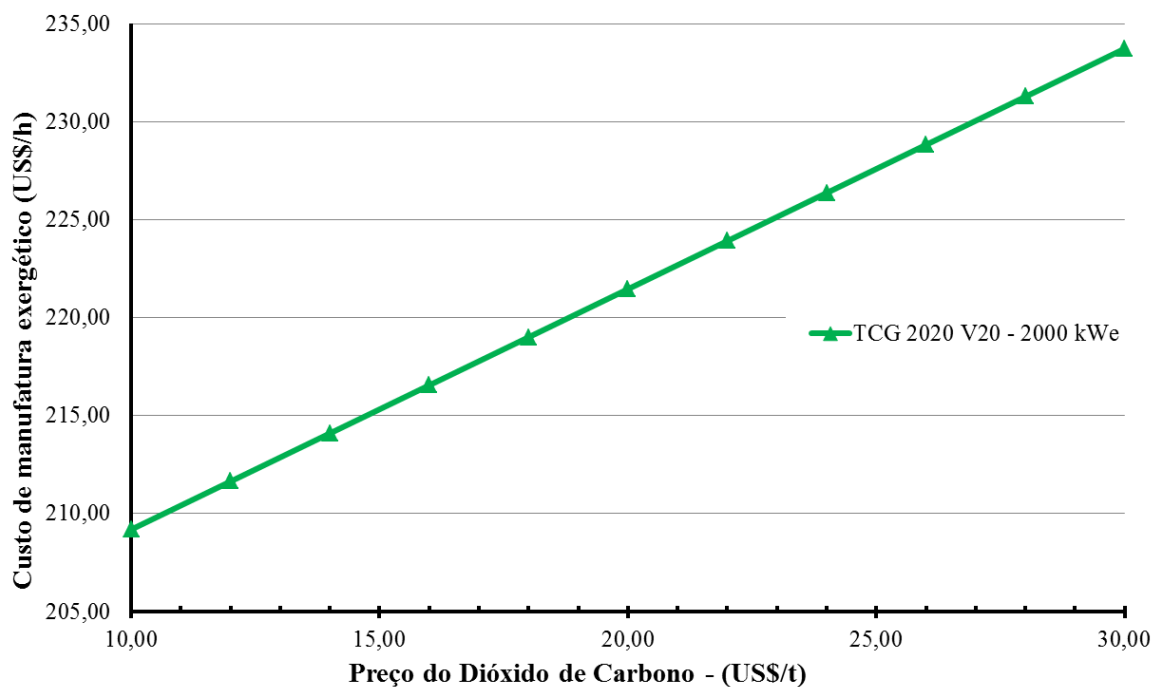
Para melhor ilustrar a influência do preço do CO₂ no custo de manufatura exergético, os resultados da análise para os motores de menor e maior capacidade de produção de energia elétrica são apresentados nas Figuras 22 e 23, respectivamente.

Figura 22: Custo de manufatura exergético em função do preço da tonelada de CO₂ (método 1)



Fonte: Elaboração própria

Figura 23: Custo de manufatura exergético em função do preço da tonelada de CO₂ (método 1)



Fonte: Elaboração própria

É possível notar analisando-se as Figuras 20 e 21 que o preço da tonelada de CO₂ influi diretamente no custo de manufatura exergético. Para o caso do motor MWM, seu custo manufatura exergético variou entre 248,13 US\$/h (10,00 US\$/t de CO₂) e 272,68 US\$/h (30,00 US\$/t de CO₂).

4.2.11 Análise dos resultados obtidos para o método 1

Para o método 1, os resultados e os dados utilizados para os cálculos são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33: Comparativo entre as parcelas do sistema com o custo das emissões (método 1)

	BRANCO BT-5000 Bio 4 KWe	QUANTUM Q3.3 TSI 27,5 kWe	PERKINS 4008-30 TRS2 506 kWe	MWM TCG 2020 V20 2000 kWe
Eletricidade				
Parcela de Investimeto [US\$/kWh]	0,0715	0,0715	0,0715	0,0715
Parcela de operação [US\$/kWh]	0,0917	0,0551	0,0476	0,0437
Parcela de CO ₂ [US\$/kWh]	0,0243	0,0146	0,0126	0,0116
Parcela de (CO ₂) _e [US\$/kWh]	0,0261	0,0157	0,0135	0,0124
C _{ELE} (sem CO ₂) [US\$/kWh]	0,1633	0,1267	0,1192	0,1153
C _{ELE} (com CO ₂) [US\$/kWh]	0,1877	0,1413	0,1319	0,1270
C _{ELE} (com (CO ₂) _e) [US\$/kWh]	0,1894	0,1424	0,1328	0,1278
Água Quente 1				
Parcela de Investimeto [US\$/kWh]	0,0	0,0035	0,0035	0,0035
Parcela de operação [US\$/kWh]	0,0	0,0551	0,0476	0,0437
Parcela de CO ₂ [US\$/kWh]	0,0	0,0146	0,0126	0,0116
Parcela de (CO ₂) _e [US\$/kWh]	0,0	0,0157	0,0135	0,0124
C _{AQ-1} (sem CO ₂) [US\$/kWh]	0,0	0,0587	0,0512	0,0473
C _{AQ-1} (com CO ₂) [US\$/kWh]	0,0	0,0733	0,0639	0,0590
C _{AQ-1} (com (CO ₂) _e) [US\$/kWh]	0,0	0,0744	0,0648	0,0598

Água Quente 2				
Parcela de Investimeto [US\$/kWh]	0,0035	0,0035	0,0035	0,0035
Parcela de operação [US\$/kWh]	0,0917	0,0551	0,0476	0,0437
Parcela de CO ₂ [US\$/kWh]	0,0243	0,0146	0,0126	0,0116
Parcela de (CO ₂) _e [US\$/kWh]	0,0261	0,0157	0,0135	0,0124
C _{AQ,2} (sem CO ₂) [US\$/kWh]	0,0953	0,0587	0,0512	0,0473
C _{AQ,2} (com CO ₂) [US\$/kWh]	0,1197	0,0733	0,0639	0,0590
C _{AQ,2} (com (CO ₂) _e) [US\$/kWh]	0,1215	0,0744	0,0648	0,0598
H [h/ano]: 4380	k [anos]: 5	r [%]: 6		

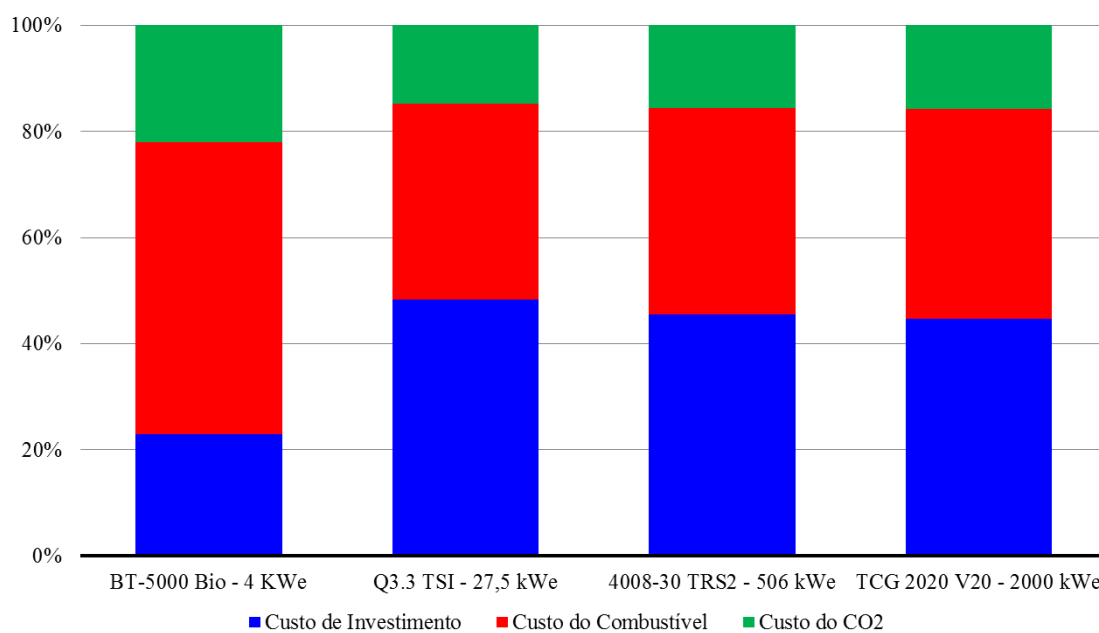
Fonte: Elaboração própria

Quando comparado a parcela de CO₂ ou de (CO₂)_e com as demais, pode-se notar que esta não é desprezível e sua influencia no custo de manufatura exergético deve ser considerada, conforme Tabela 33.

Verifica-se também na Tabela 33 que para o caso da água quente produzida pelo trocador de calor 2, o custo das emissões do sistema ultrapassa o valor da parcela do investimento.

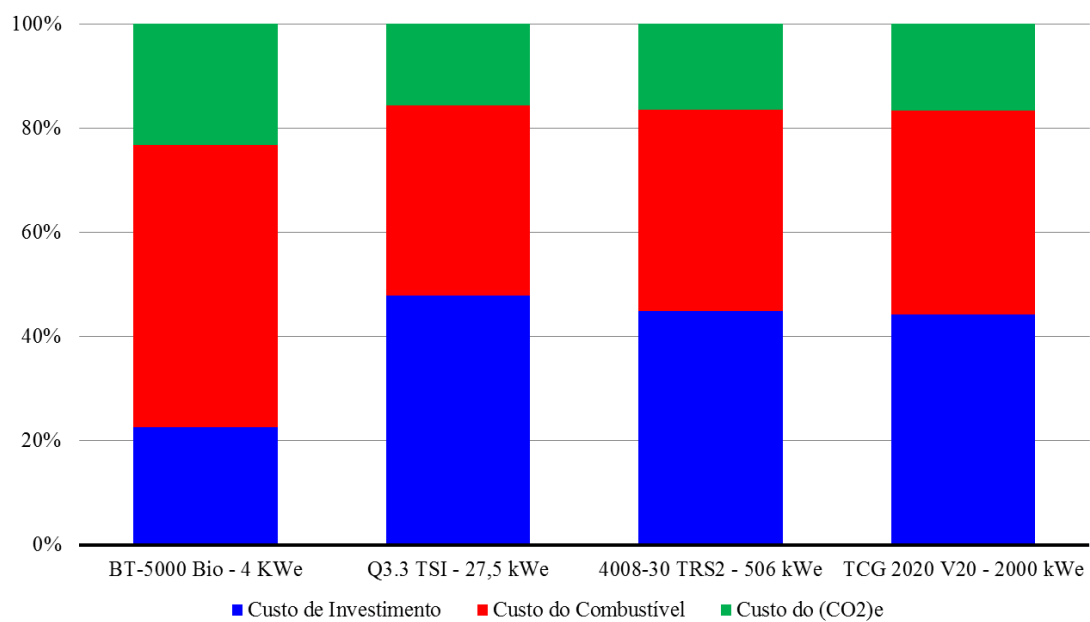
Com base na Tabela 33 também é possível quantificar a participação de cada parcela no custo de manufatura exergético. As Figuras 24 e 25 demostram essa composição.

Figura 24: Composição do custo de manufatura exergético considerando o CO₂



Fonte: Elaboração própria

Figura 25: Composição do custo de manufatura exergético considerando o (CO₂)_e



Fonte: Elaboração própria

4.3.1 Método 2:

O diagrama funcional exergoeconômico do ciclo de cogeração é representado por figuras geométricas que identificam os componentes e processos do ciclo, assim como por um conjunto de linhas que representam os incrementos exergéticos com insumos e produtos em cada componente.

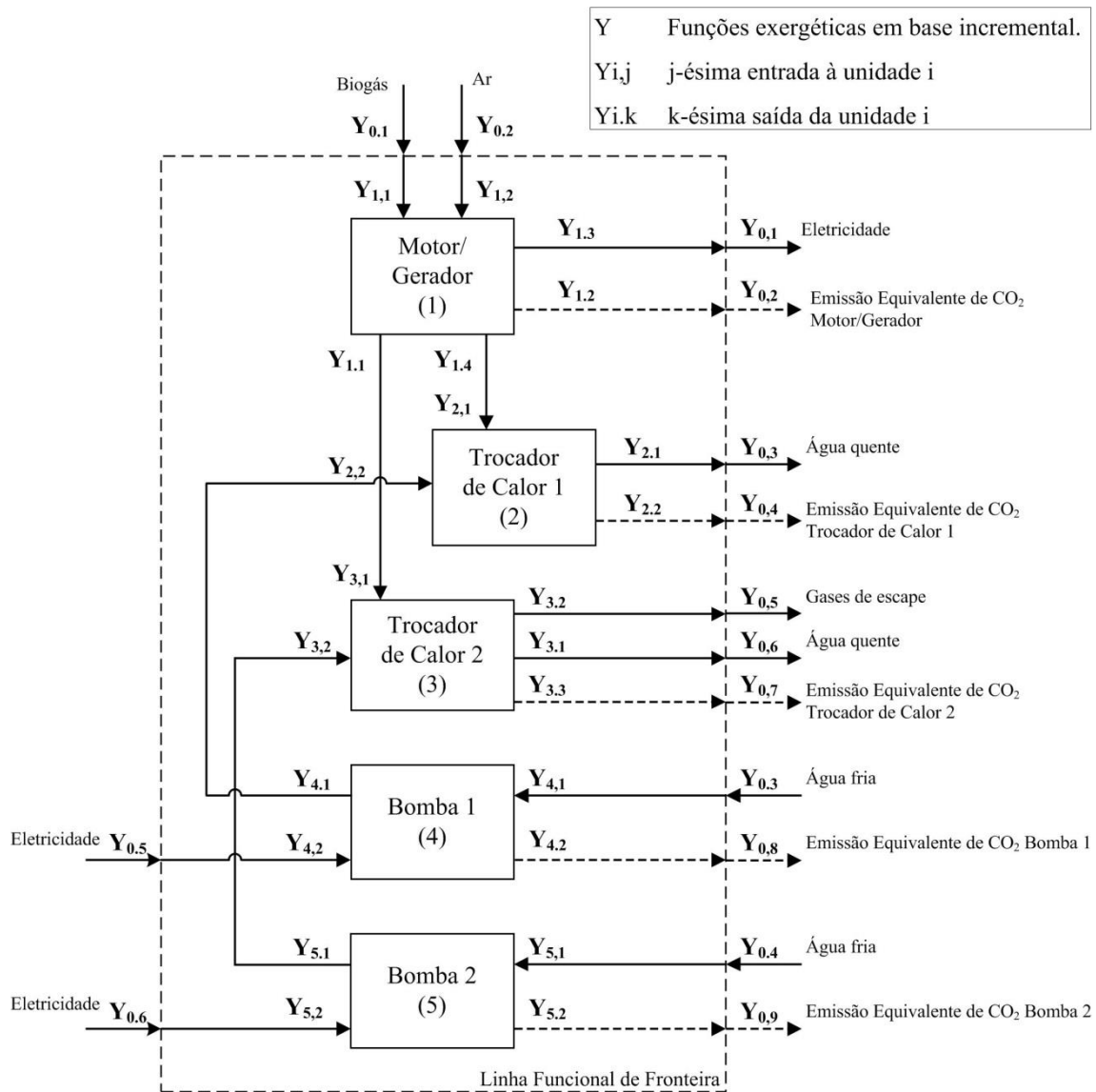
Ele também é composto por uma linha funcional de fronteira, que separa os insumos e os produtos da planta, do meio exterior, ou seja, dessa linha entram e saem o biogás, ar, gases de escapamento, água fria, água quente e energia elétrica.

Os componentes do ciclo são identificados pela letra U (unidade). Estas unidades são conectadas entre si por meio de linhas funcionais que representam os incrementos exergéticos (funções exergéticas em base incrementais) que são identificadas pela letra Y.

Para a identificação dos incrementos exergéticos associados às entradas e saídas de cada unidade são utilizadas as notações $Y_{i,j}$ (j-ésima entrada i-ésima unidade) e $Y_{i,k}$ (k-ésima saída i-ésima unidade), respectivamente. No caso do sistema como um todo, a notação utilizada é a seguinte: $Y_{0,k}$, que representa a entrada do insumo do ambiente ao sistema, e $Y_{0,j}$, que representa a saída do produto do sistema ao meio ambiente.

Para o ciclo de cogeração com um MCI, o diagrama funcional é apresentado na Figura 26.

Figura 26: Diagrama funcional exergoeconômico do ciclo de cogeração sem considerar as emissões equivalentes de CO_2



Fonte: Elaboração própria

Nesse diagrama funcional também estão presentes as emissões equivalentes de CO_2 . As linhas das emissões de dióxido de carbono são representadas por linhas tracejadas, pois esses fluxos são fictícios. Eles não são gerados naquela unidade, apenas representa a parcela de emissão de CO_2 referente a ela.

As funções exergéticas incrementais do ciclo são representadas pelas Equações (4.11) a (4.34).

$$Y_{1,1} = \dot{m}_{comb} \cdot ex_2 \quad (4.11)$$

$$Y_{1,2} = \dot{m}_{ar} \cdot ex_1 \quad (4.12)$$

$$Y_{1,1} = \dot{m}_{gases} \cdot ex_{10} \quad (4.13)$$

$$Y_{1,2} = \dot{m}_{CO_2} \quad (4.14)$$

$$Y_{1,3} = P_{ele} - Y_{1,2} \quad (4.15)$$

$$Y_{1,4} = Y_{4,2} \quad (4.16)$$

$$Y_{1,5} = \dot{m}_{agua_jaqueta} \cdot (ex_3 - ex_4) \quad (4.17)$$

$$Y_{2,1} = Y_{1,5} \quad (4.18)$$

$$Y_{2,2} = Y_{5,2} \quad (4.19)$$

$$Y_{2,2} = \dot{m}_{agua} \cdot (ex_5 - ex_4) \quad (4.20)$$

$$Y_{2,1} = \dot{m}_{agua_TC1} \cdot (ex_9 - ex_7) \quad (4.21)$$

$$Y_{2,2} = \dot{m}_{CO_2} \quad (4.22)$$

$$Y_{3,1} = Y_{1,1} \quad (4.23)$$

$$Y_{3,2} = Y_{5,1} \quad (4.24)$$

$$Y_{3,1} = \dot{m}_{agua_TC2} \cdot (ex_{10} - ex_8) \quad (4.25)$$

$$Y_{3,2} = \dot{m}_{gases} \cdot (ex_{11} - ex_{12}) \quad (4.26)$$

$$Y_{3.3} = \dot{m}_{CO_2} \quad (4.27)$$

$$Y_{4,1} = \left(\dot{m}_{agua_TC1} + \dot{m}_{agua_TC2} \right) \cdot ex_5 \quad (4.28)$$

$$Y_{4,2} = P_{ele_BOMBA} \quad (4.29)$$

$$Y_{4.1} = \left(\dot{m}_{agua_TC1} + \dot{m}_{agua_TC2} \right) \cdot (ex_6 - ex_5) \quad (4.30)$$

$$Y_{4.2} = \dot{m}_{CO_2} \quad (4.31)$$

$$Y_{5,1} = Y_{4,1} \quad (4.32)$$

$$Y_{5.1} = \dot{m}_{agua_TC2} \cdot (ex_8 - ex_5) \quad (4.33)$$

$$Y_{5.2} = \dot{m}_{agua_TC1} \cdot (ex_7 - ex_5) \quad (4.34)$$

Os resultados das funções dos motores analisados são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34: Resultado dos cálculos dos fluxos exergéticos

Funções de Incremento Exergético	BRANCO BT-5000 bio	QUANTUM Q3.3 TSI	PERKINS 4008-30 TRS2	MWM TCG 2020 V20
Y _{1,1}	20,09400	85,95774	1345,18274	4861,63556
Y _{1,2}	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Y _{1.1}	1,57100	6,72040	105,16984	380,09515
Y _{1.2}	0,00057	0,00943	0,13449	0,48774
Y _{1.3}	0,00054	0,00220	0,03462	0,12508
Y _{1.4}	4,01643	27,49057	505,86551	1999,51226
Y _{1.5}	0,00000	4,42312	60,90134	221,15735
Y _{2,1}	0,00000	4,42312	60,90134	221,15735
Y _{2,2}	0,00000	0,00605	0,08335	0,30269
Y _{2.1}	0,00000	1,58853	21,87222	79,42687
Y _{2.2}	0,00000	0,00013	0,00179	0,00649
Y _{3,1}	1,57100	6,72040	105,16984	380,09515
Y _{3,2}	0,00050	0,00212	0,03318	0,11992
Y _{3.1}	0,13006	0,55635	8,70651	31,46625
Y _{3.2}	1,27614	5,45906	85,43068	308,75570
Y _{3.3}	0,00005	0,00020	0,00309	0,01116
Y _{4,1}	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Y _{4,2}	0,00057	0,00943	0,13449	0,48774
Y _{4.1}	0,00050	0,00817	0,11653	0,42261
Y _{4.2}	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001
Y _{5,1}	0,00050	0,00817	0,11653	0,42261
Y _{5.1}	0,00050	0,00212	0,03318	0,11992
Y _{5.2}	0,00000	0,00605	0,08335	0,30269
Y _{0,1}	20,09400	85,95774	1345,18274	4861,63556
Y _{0,2}	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Y _{0,3}	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Y _{0,1}	4,01643	27,49057	505,86551	1999,51226
Y _{0,2}	0,00054	0,00220	0,03462	0,12508
Y _{0,3}	0,00000	1,58853	21,87222	79,42687
Y _{0,4}	0,00000	0,00013	0,00179	0,00649
Y _{0,5}	0,13006	0,55635	8,70651	31,46625
Y _{0,6}	0,13006	0,55635	8,70651	31,46625
Y _{0,7}	0,00005	0,00020	0,00309	0,01116
Y _{0,8}	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001

Fonte: Elaboração própria

4.3.2 Custo específico da produção de energia elétrica pelo método 2

O custo específico da energia elétrica produzida, Equação (4.35), considera o incremento exergético na produção de energia elétrica. O custo de manutenção do sistema de geração de energia elétrica foi considerado como sendo 10 % do valor do investimento (SILVEIRA e TUNA, 2004).

$$C_{ELE} = \frac{Inv_{MOTOR/GERADOR} \cdot f \cdot \phi}{H \cdot Y_{1,3}} + \frac{c_{comb} \cdot FP'_{ELE} \cdot Y_{1,1}}{Y_{1,3}} + \frac{c_{CO_2} \cdot FP'_{ELE} \cdot \dot{m}_{CO_2}}{Y_{1,3}} \quad (4.35)$$

Onde:

C_{ele}	Custo específico da energia elétrica produzida [US\$/kWh];
C_{comb}	Preço do combustível [US \$/kWh];
FP'_{ELE}	Fator de ponderação pela contribuição exergética incremental dos componentes [-];
$Y_{1,4}$	Potência elétrica gerada [kW];
f	Fator de anuidade [1/ano];
H	Período de operação da planta [h/ano];
$Inv_{MOTOR/GERADOR}$	Investimento no conjunto motor-gerador [US\$];
ϕ	Fator de manutenção [-];
c_{CO_2}	Preço da tonelada de CO ₂ [US\$/t];
$\dot{m}_{CO_2}$	Fluxo de CO ₂ nos gases de escapamento [t/h].

4.3.3 Custo específico produção de água quente pelo método 2

- Custo específico da produção de água quente pela água da jaqueta:

Analogamente ao Método 1, o custo específico da água quente produzida pelo trocador de calor conectado ao sistema de refrigeração do motor é dado pela Equação (4.36). O fator de manutenção do sistema de produção de água quente foi considerado como sendo 10 % do valor do investimento (SILVEIRA e TUNA, 2004).

$$c_{AQ_1} = \frac{Inv_{BOMBA_1/TC_1} \cdot f \cdot \phi}{H \cdot Y_{2,1}} + \frac{c_{comb} \cdot FP'_{AQ_1} \cdot Y_{1,1}}{Y_{2,1}} + \frac{c_{co_2} \cdot FP'_{AQ_1} \cdot \dot{m}_{co_2}}{Y_{2,1}} \quad (4.36)$$

Onde:

Inv_{BOMBA_1/TC_1}	Investimento no trocadores de calor 1 e bomba 1 [US\$];
f	Fator de anuidade [1/ano];
H	Período de operação da planta [h/ano];
ϕ	Fator de manutenção [-];
c_{co_2}	Preço da tonelada de CO ₂ [US\$/kWh];
c_{comb}	Preço do combustível [US \$/t];
FP'	Fator de ponderação pela contribuição exergética incremental dos componentes [-];
$\dot{m}_{co_2}$	Fluxo de CO ₂ nos gases de escapamento [t/h];

$Y_{2,1}$ Fluxo exergético incremental da água quente do trocador de calor 1 [kW].

- Custo específico da produção de água quente pelos gases de exaustão:

O custo específico da água quente 2 é dado pela Equação (4.37).

$$c_{AQ-2} = \frac{Inv_{BOMBA_2/TC_2} \cdot f \cdot \phi}{H \cdot Y_{3,1}} + \frac{c_{comb} \cdot FP'_{AQ-2} \cdot Y_{1,1}}{Y_{3,1}} + \frac{c_{CO_2} \cdot FP'_{AQ-2} \cdot \dot{m}_{CO_2}}{Y_{3,1}} \quad (4.37)$$

Onde:

Inv_{BOMBA_2/TC_2}	Investimento no trocadores de calor 2 e bomba 2 [US\$];
f	Fator de anuidade [1/ano];
H	Período de operação da planta [h/ano];
ϕ	Fator de manutenção [-];
c_{CO_2}	Preço da tonelada de CO ₂ [US\$/t];
c_{comb}	Preço do combustível [US\$/kWh];
FP'	Fator de ponderação pela contribuição exergética incremental dos componentes [-];
$Y_{1,1}$	Fluxo exergético incremental do combustível [kW];
$Y_{3,1}$	Fluxo exergético incremental da água quente do trocador de calor 2 [kW];
$\dot{m}_{CO_2}$	Fluxo de CO ₂ nos gases de escapamento [t/h].

4.3.4 Fator de ponderação pela contribuição exergética incremental dos componentes

Do mesmo modo que para o Método 1, um fator de ponderação é necessário para a distribuição do custo do combustível entre os produtos do sistema. Os fatores de ponderação para a energia elétrica e água quente são expressos pelas Equações (4.38), (4.39) e (4.40).

$$FP'_{ELE} = \frac{Y_{1,4}}{Y_{1,4} + Y_{2,1} + Y_{3,1}} \quad (4.38)$$

$$FP'_{AQ-1} = \frac{Y_{2,1}}{Y_{1,4} + Y_{2,1} + Y_{3,1}} \quad (4.39)$$

$$FP'_{AQ-2} = \frac{Y_{3,1}}{Y_{1,4} + Y_{2,1} + Y_{3,1}} \quad (4.40)$$

4.3.5 Análise pelo método 2

Analogamente ao método 1, considera-se 4380 horas de operação, um período de retorno de investimento variando entre um e doze anos e uma taxa de juros de 6 %.

4.3.6 Sem considerar as emissões de CO₂

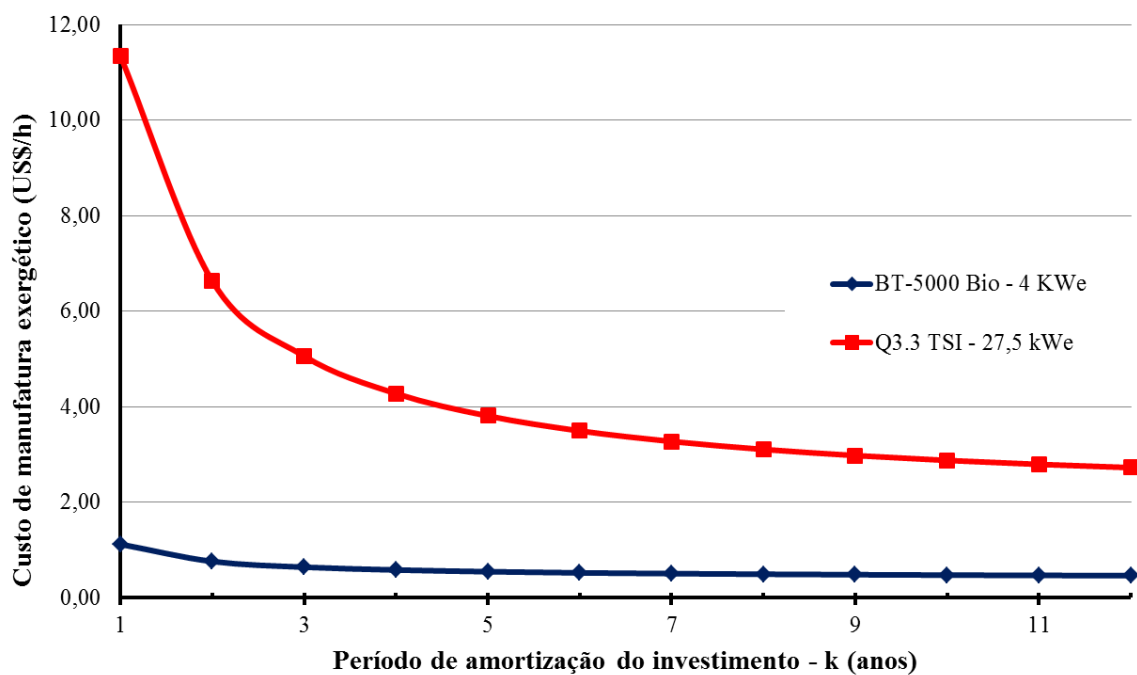
O resultado do custo de manufatura exergético para o método 2 sem considerar as emissões em função do período de amortização são apresentados na Tabela 35.

Tabela 35: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização (método 2)

	BRANCO	QUANTUM	PERKINS	MWM
	BT-5000 Bio	Q3.3 TSI	4008-30 TRS2	TCG 2020 V20
k [ano]	4 KWe	27,5 kWe	506 kWe	2000 kWe
1	1,70	10,62	190,17	742,01
2	1,06	6,26	110,26	426,65
3	0,85	4,80	83,65	321,65
4	0,74	4,08	70,37	269,24
5	0,68	3,64	62,42	237,86
6	0,63	3,36	57,14	217,00
7	0,60	3,15	53,38	202,16
8	0,58	3,00	50,57	191,06
9	0,56	2,88	48,39	182,48
10	0,55	2,78	46,66	175,64
11	0,54	2,71	45,25	170,08
12	0,53	2,64	44,08	165,47
r[%]: 6 H[h/ano]: 4380				
Fonte: Elaboração própria				

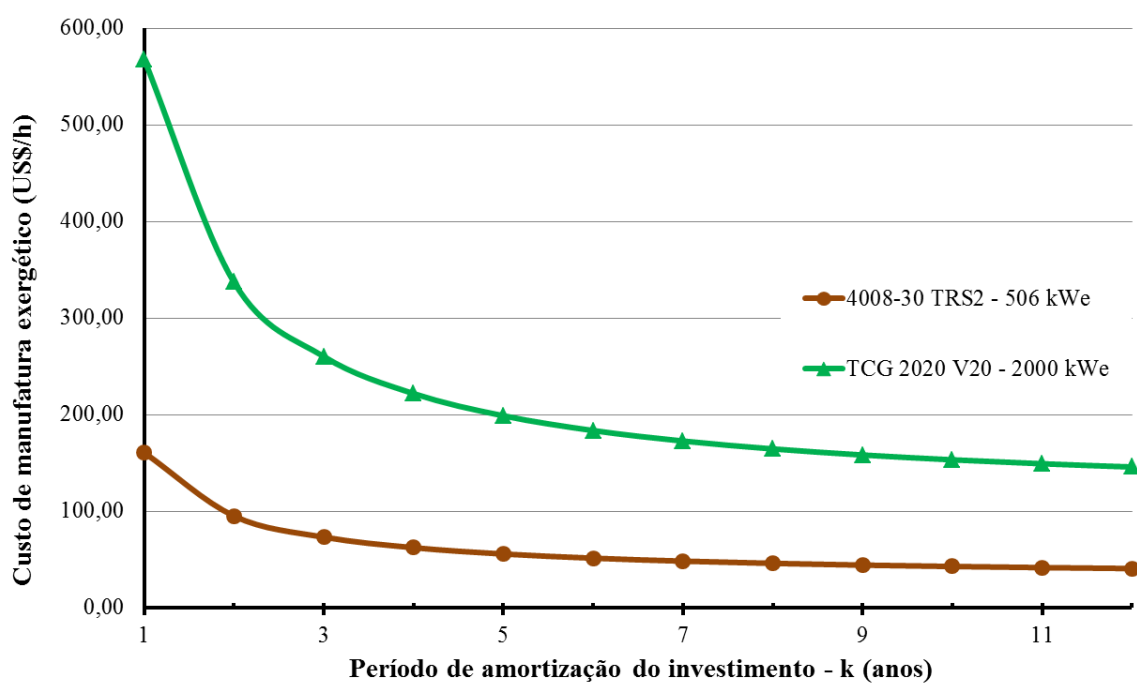
A partir dos dados contidos na Tabela 35, pode-se gerar os gráficos do custo de manufatura exergético em função do período de retorno para o Método 2 (Figura 27 e 28).

Figura 27: Custo manufatura exerético em função do período de amortização (método 2)



Fonte: Elaboração própria

Figura 28: Custo manufatura exerético em função do período de amortização (método 2)



Fonte: Elaboração própria

Para este caso, obteve-se um custo de manufatura exergético de 1,70 US\$/h para o motor de menor potência e de 742,01 US\$/h para o motor de maior potência, para o primeiro ano de amortização e 0,53 US\$/h e 165,47 US\$/h, respectivamente, para o décimo segundo ano.

4.3.7 Considerando-se o custo das emissões de CO₂

Considerando-se o custo da emissão do CO₂ para o método 2, o valor do custo de manufatura exergético para este cenário são apresentados na Tabela 36.

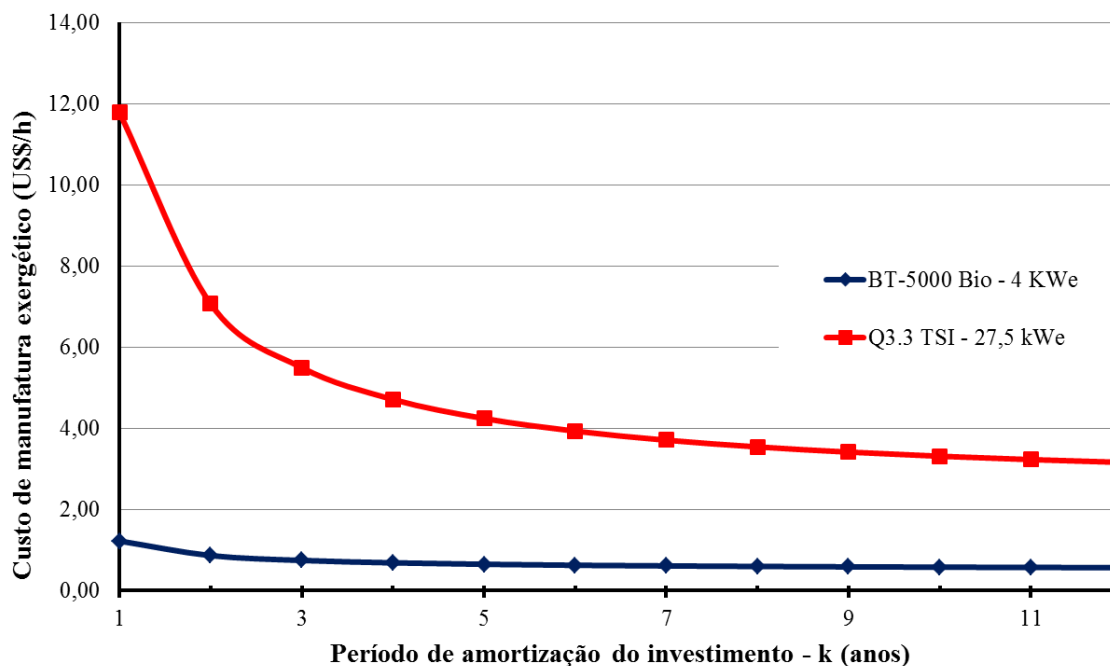
Tabela 36: Custo de manufatura exergético em função do preço da tonelada de CO₂ (método 2)

	BRANCO	QUANTUM	PERKINS	MWM
	BT-5000 Bio	Q3.3 TSI	4008-30 TRS2	TCG 2020 V20
k [ano]	4 KWe	27,5 kWe	506 kWe	2000 kWe
1	1,80	11,05	196,96	766,56
2	1,16	6,69	117,05	451,20
3	0,95	5,24	90,45	346,20
4	0,84	4,51	77,17	293,79
5	0,78	4,08	69,22	262,41
6	0,74	3,79	63,93	241,56
7	0,71	3,59	60,17	226,71
8	0,68	3,43	57,36	215,62
9	0,67	3,31	55,18	207,03
10	0,65	3,22	53,45	200,19
11	0,64	3,14	52,04	194,63
12	0,63	3,08	50,87	190,02
r[%]: 6 H[h/ano]: 4380				

Fonte: Elaboração própria

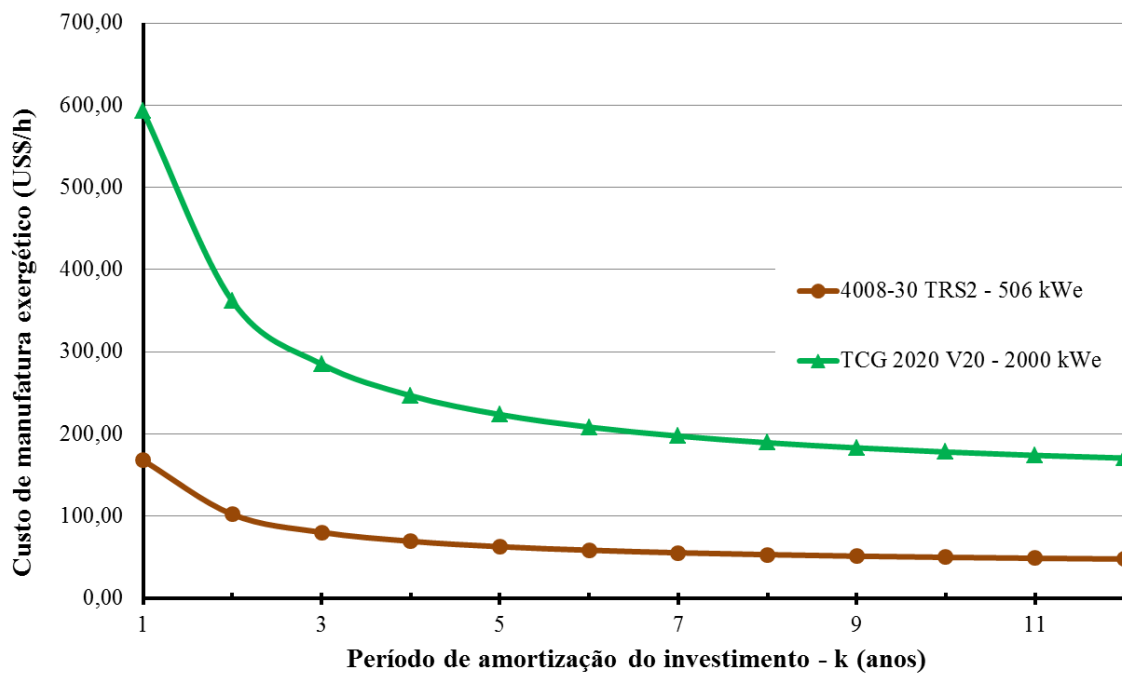
Os resultados são apresentados graficamente pelas Figuras 29 e 30.

Figura 29: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização, considerando as emissões de CO₂ (método 2)



Fonte: Elaboração própria

Figura 30: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização, considerando as emissões de CO₂ (método 2)



Fonte: Elaboração própria

Neste caso, o custo de manufatura exergético variou entre 1,80 e 766,56 US\$/h no primeiro ano de amortização e 0,63 a 192 US\$/h para o décimo segundo ano.

4.3.8 Considerando-se o custo do $(CO_2)_e$

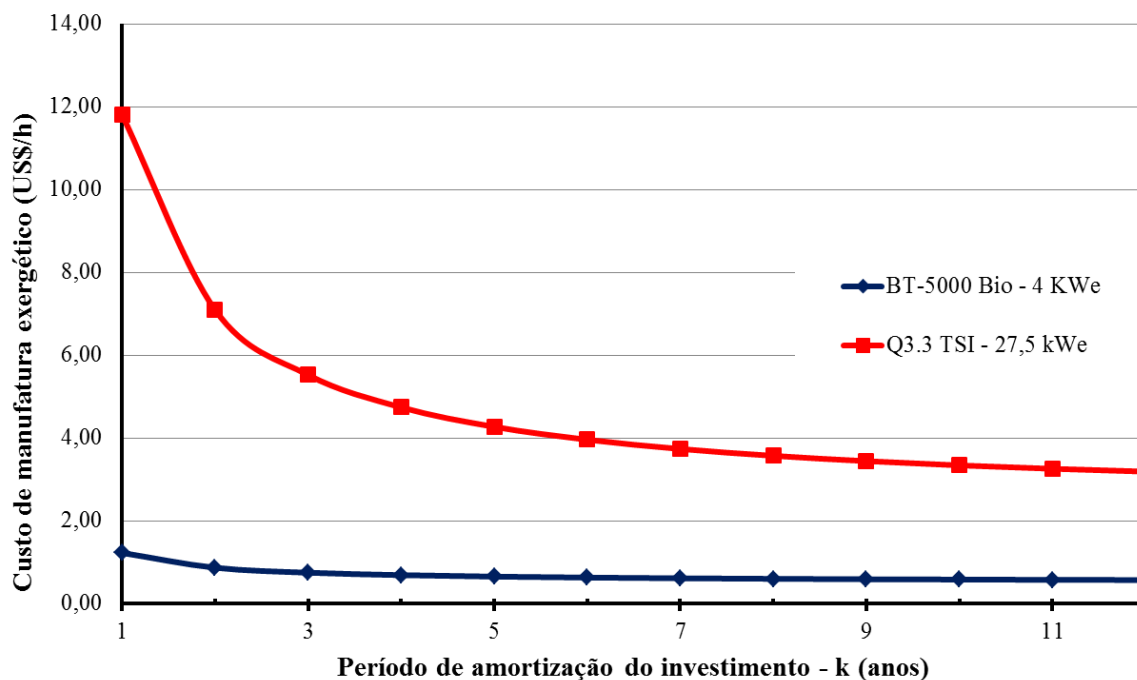
A Tabela 37 apresenta o custo de manufatura exergético em função do período de amortização para o método 2.

Tabela 37: Custo de manufatura exergético em função do preço da tonelada de $(CO_2)_e$ (método 2)

	BRANCO	QUANTUM	PERKINS	MWM
	BT-5000 Bio	Q3.3 TSI	4008-30 TRS2	TCG 2020 V20
k [ano]	4 KWe	27,5 kWe	506 kWe	2000 kWe
1	1,81	11,08	197,45	768,34
2	1,17	6,72	117,55	452,98
3	0,95	5,27	90,94	347,98
4	0,85	4,54	77,66	295,57
5	0,79	4,11	69,71	264,20
6	0,74	3,82	64,43	243,34
7	0,71	3,62	60,66	228,49
8	0,69	3,46	57,85	217,40
9	0,67	3,34	55,68	208,81
10	0,66	3,25	53,94	201,97
11	0,65	3,17	52,53	196,41
12	0,64	3,11	51,37	191,81
r[%]: 6 H[h/ano]: 4380				
Fonte: Elaboração própria				

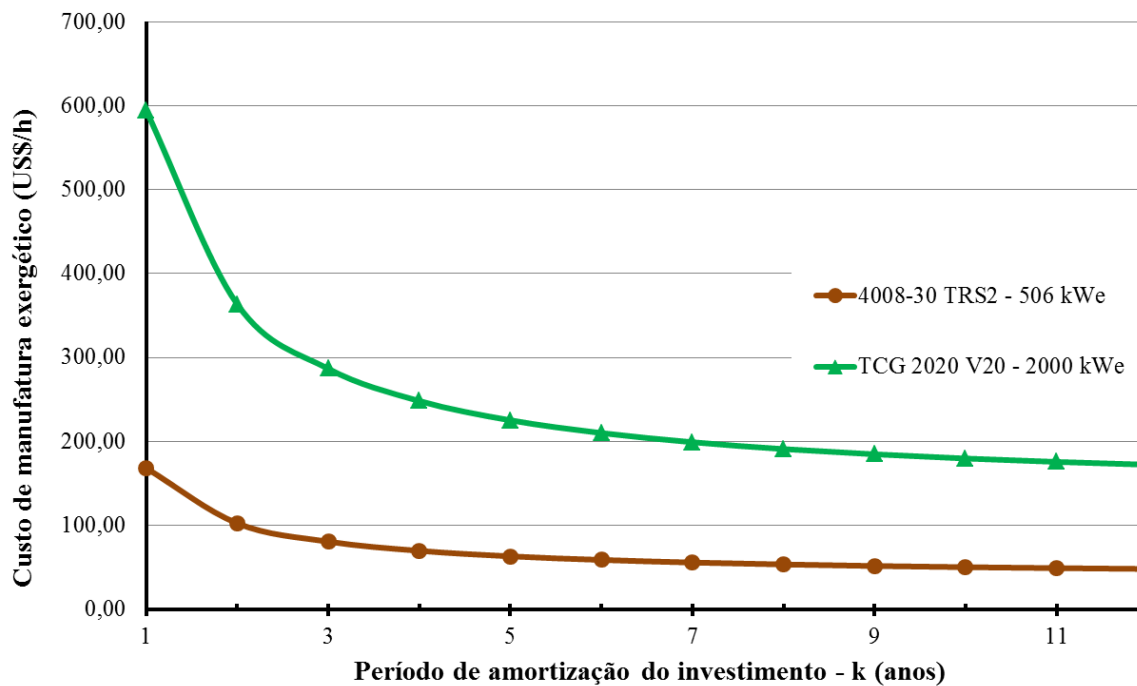
O custo de manufatura exergético para o cenário onde se leva em consideração a emissão de $(CO_2)_e$ é representado graficamente pelas Figuras 31 e 32.

Figura 31: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização, considerando as emissões de $(CO_2)_e$ (método 2)



Fonte: Elaboração própria

Figura 32: Custo de manufatura exergético em função do período de amortização, considerando as emissões de $(CO_2)_e$ (método 2)



Fonte: Elaboração própria

Conforme observado no método 1, para o método 2 a diferença entre o custo de manufatura exergético quando leva-se em conta o $(CO_2)_e$ também demonstra uma pequena diferença quando comparado com o CO_2 apenas.

4.3.9 Influência da taxa de juros

Para os mesmos conjuntos motor-gerador também foi analisado a influência da taxa de juros (r) no custo de manufatura exergético quando se fixa o período de retorno de investimento em 6 anos para o método 2. Os resultados dessa análise são apresentados na Tabela 38.

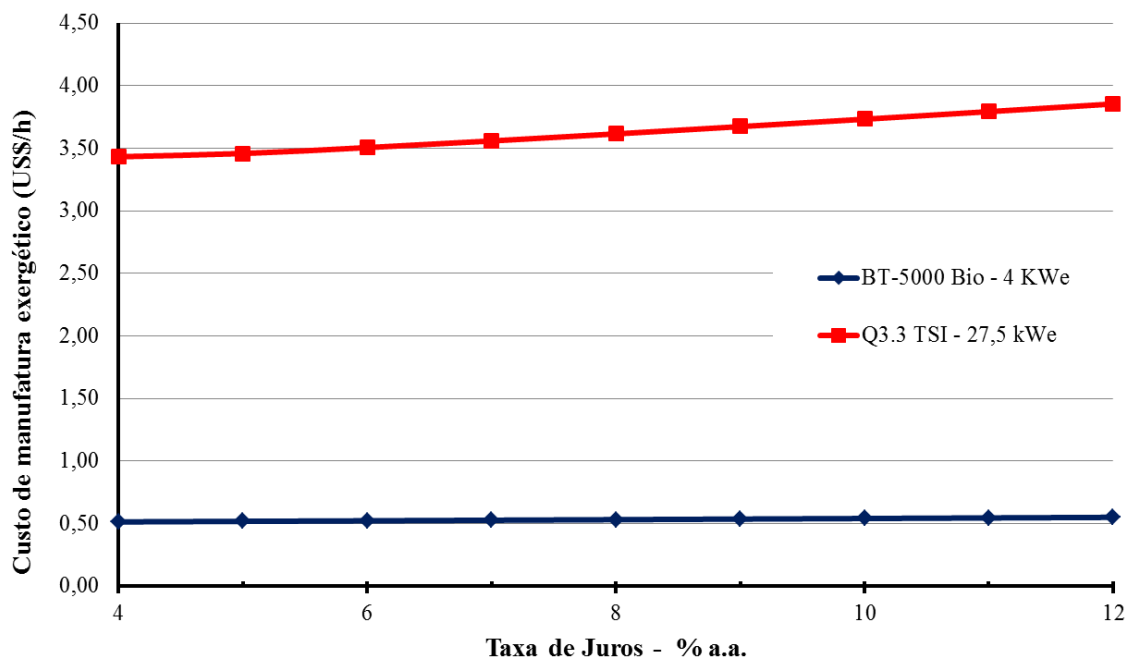
Tabela 38: Custo de manufatura exergético em US\$/kWh

	BRANCO BT-5000 Bio 4 KWe	QUANTUM Q3.3 TSI 27,5 kWe	PERKINS 4008-30 TRS2 506 kWe	MWM TCG 2020 V20 2000 kWe
r [%]				
4	0,73	3,72	62,47	235,62
5	0,73	3,77	63,44	239,45
6	0,74	3,82	64,43	243,34
7	0,75	3,88	65,42	247,28
8	0,76	3,93	66,44	251,28
9	0,77	3,99	67,46	255,33
10	0,78	4,04	68,50	259,42
11	0,78	4,10	69,55	263,57
12	0,79	4,16	70,62	267,77

Fonte: Elaboração própria

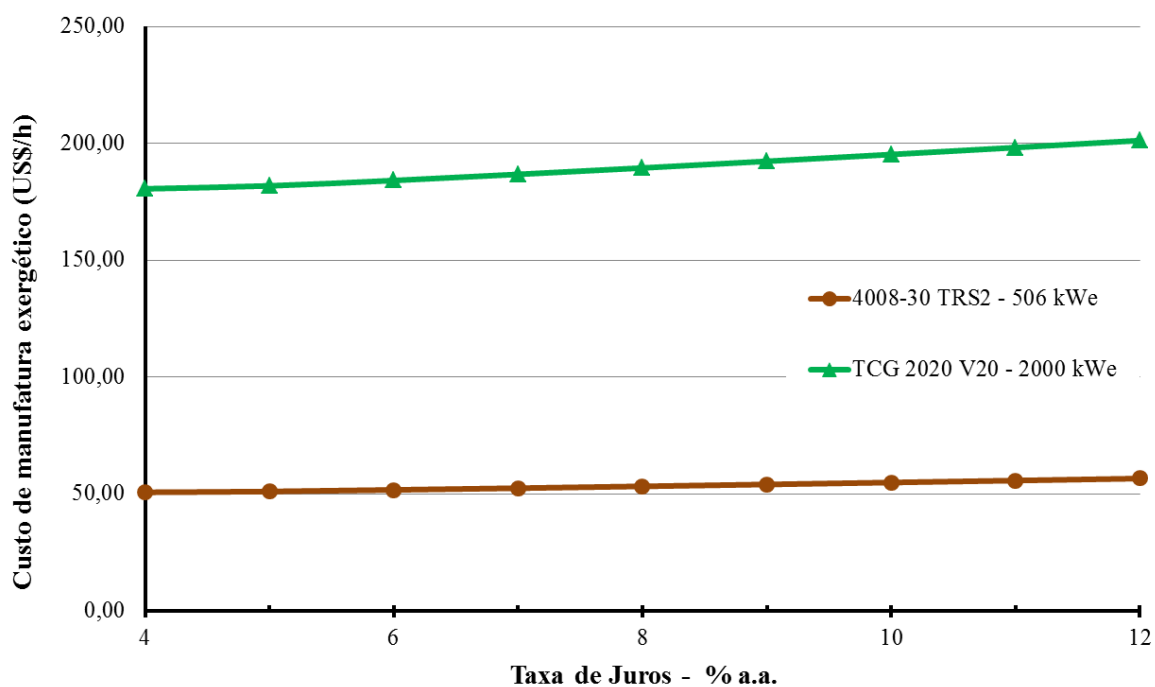
Graficamente, essa variação é apresentada pelas Figuras 33 e 34.

Figura 33: Custo da produção de energia elétrica em função da taxa de juros ($k=12$ anos e $H=4380$ horas)



Fonte: Elaboração própria

Figura 34: Custo da produção de água quente em função da taxa de juros ($k=12$ anos e $H=4150$ horas)



Fonte: Elaboração própria

As Figuras 20 e 21 permite concluir que o custo de manufatura exergético é diretamente proporcional à taxa de juros, ou seja, quanto maior a taxa de juros, maior será o custo de manufatura exergético do ciclo. É possível identificar também que a taxa de juros tem maior influência nos motores MWM e Quantum, os quais possuem o maior custo de manufatura exergético quando comparado com o outro motor escolhido.

4.3.10 Influência do preço da tonelada de CO₂

Do mesmo modo que para o método 1, variando-se o preço da tonelada de carbono, é possível conhecer sua influência no custo de manufatura exergético, conforme disposto na Tabela 39.

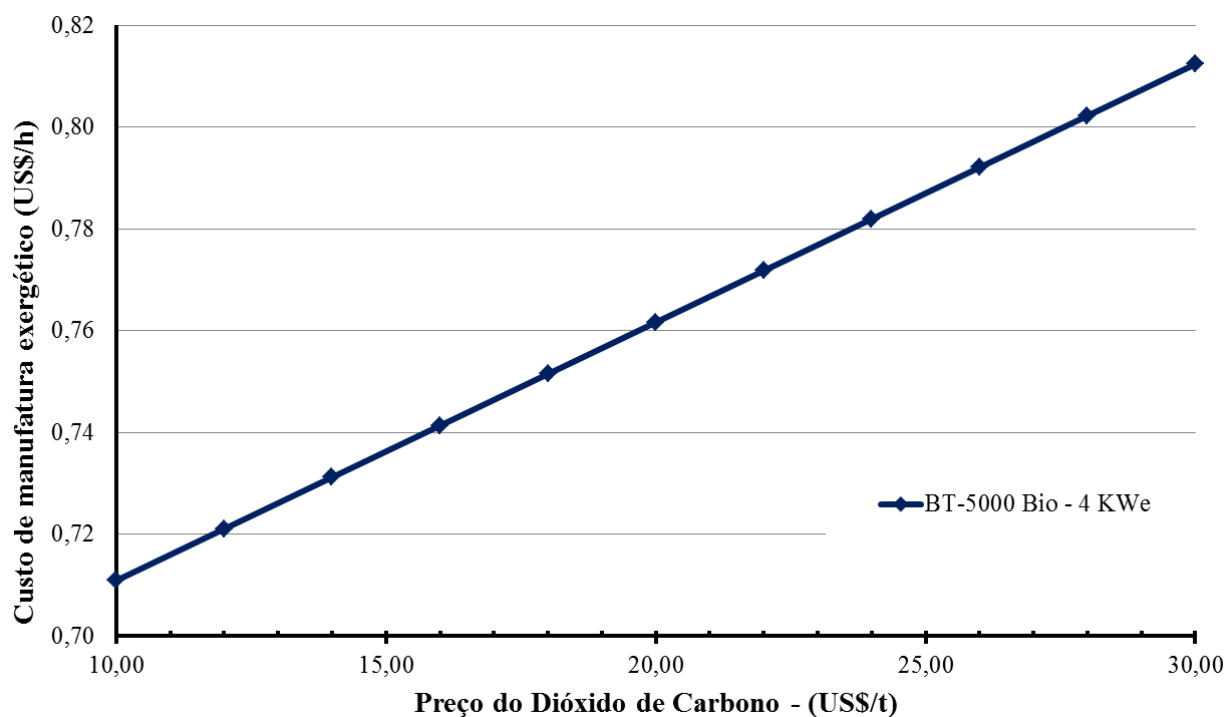
Tabela 39: Custo de manufatura exergético em função do preço da tonelada de CO₂ (método 2)

	BRANCO	QUANTUM	PERKINS	MWM
	BT-5000 Bio	Q3.3 TSI	4008-30 TRS2	TCG 2020 V20
c _{CO2} [US\$/t]	4 KWe	27,5 kWe	506 kWe	2000 kWe
10,00	0,84	3,89	64,93	246,82
12,00	0,85	3,94	65,61	249,27
14,00	0,86	3,98	66,28	251,73
16,00	0,87	4,02	66,96	254,18
18,00	0,88	4,07	67,64	256,64
20,00	0,89	4,11	68,32	259,09
22,00	0,90	4,15	69,02	261,55
24,00	0,91	4,20	69,68	264,00
26,00	0,92	4,24	70,36	266,46
28,00	0,93	4,28	71,04	268,91
30,00	0,94	4,33	71,72	271,37
r[%]: 6 H[h/ano]: 4380				

Fonte: Elaboração própria

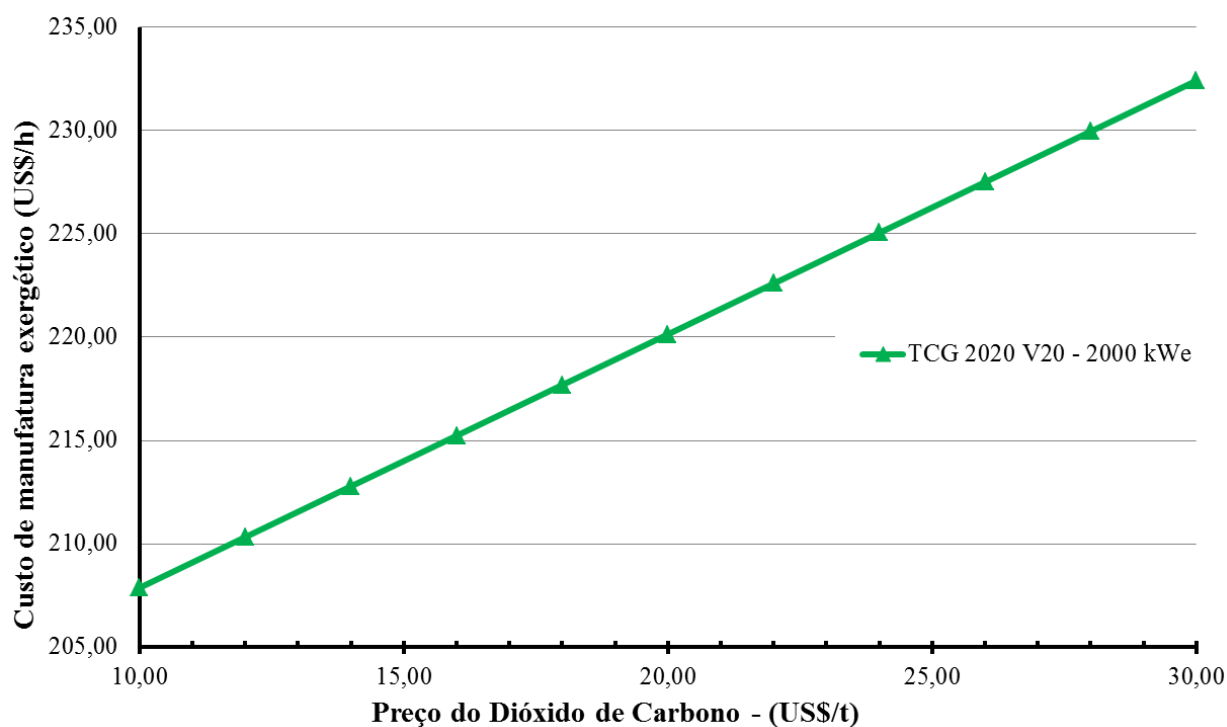
As Figuras 35 e 36 apresentam graficamente a variação dos custos em função do preço da tonelada de carbono para dois dos motores selecionados.

Figura 35: Custo de manufatura exergética em função do preço da tonelada de CO₂



Fonte: Elaboração própria

Figura 36: Custo de manufatura exergética em função do preço da tonelada de CO₂



Fonte: Elaboração própria

Novamente é possível notar, analisando-se as Figuras 25 e 26, que o preço do CO₂ é diretamente proporcional ao custo de manufatura exergético, ou seja, o custo será mais caro quanto mais caro for a tonelada de CO₂. Para o motor MWM, seu custo manufatura exergético variou entre 246,82 US\$/h (10,00 US\$/t de CO₂) e 271,37 US\$/h (30,00 US\$/t de CO₂).

4.3.11 Análise dos resultados obtidos para o método 2

Para o método 2, os resultados e os dados utilizados para os cálculos são apresentados na Tabela 40.

Tabela 40: Custo de manufatura exergético em função do preço da tonelada de CO₂

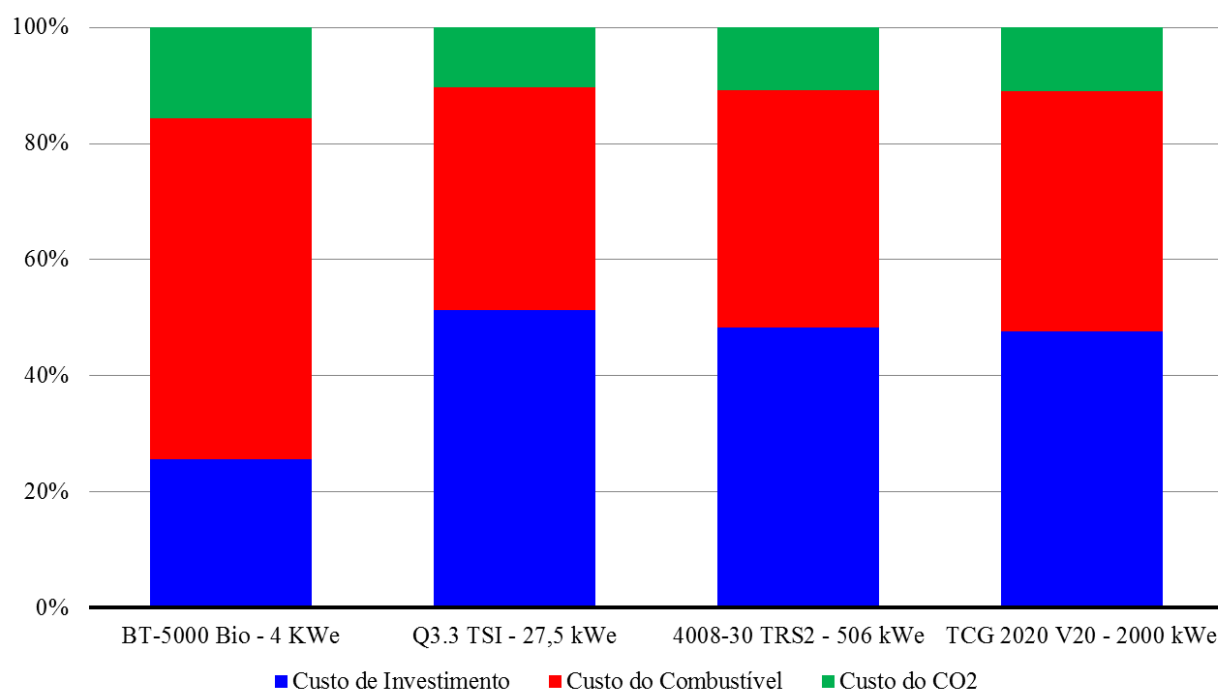
	BRANCO BT-5000 Bio 4 KWe	QUANTUM Q3.3 TSI 27,5 kWe	PERKINS 4008-30 TRS2 506 kWe	MWM TCG 2020 V20 2000 kWe
Eletricidade				
Parcela de Investimento [US\$/kWh]	0,07151	0,0715	0,0715	0,07154
Parcela de operação [US\$/kWh]	0,0913	0,0551	0,0476	0,0437
Parcela de CO ₂ [US\$/kWh]	0,0242	0,0146	0,0126	0,0116
Parcela de (CO ₂) _e [US\$/kWh]	0,0260	0,0157	0,0135	0,0124
C _{ELE} (sem CO ₂) [US\$/kWh]	0,1629	0,1266	0,1191	0,1153
C _{ELE} (com CO ₂) [US\$/kWh]	0,1871	0,1412	0,1318	0,1269
C _{ELE} (com (CO ₂) _e) [US\$/kWh]	0,1889	0,1423	0,1327	0,1277
Água Quente 1				
Parcela de Investimento [US\$/kWh]	0	0,0099	0,0099	0,0099
Parcela de operação [US\$/kWh]	0	0,0551	0,0476	0,0437
Parcela de CO ₂ [US\$/kWh]	0	0,0146	0,0126	0,0116
Parcela de (CO ₂) _e [US\$/kWh]	0	0,0157	0,0135	0,0124

C_{AQ_1} (sem CO_2) [US\$/kWh]	0	0,0650	0,0576	0,0537
C_{AQ_1} (com CO_2) [US\$/kWh]	0	0,0797	0,0702	0,0653
C_{AQ_1} (com $(CO_2)_e$) [US\$/kWh]	0	0,0807	0,0711	0,0662
Água Quente 2				
Parcela de Investimento [US\$/kWh]	0,0432	0,0432	0,0432	0,0432
Parcela de operação [US\$/kWh]	0,0913	0,0551	0,0476	0,0437
Parcela de CO_2 [US\$/kWh]	0,0242	0,0146	0,0126	0,0116
Parcela de $(CO_2)_e$ [US\$/kWh]	0,0260	0,0157	0,0135	0,0124
C_{AQ_2} (sem CO_2) [US\$/kWh]	0,1345	0,0983	0,0908	0,0869
C_{AQ_2} (com CO_2) [US\$/kWh]	0,1588	0,1129	0,1035	0,0986
C_{AQ_2} (com $(CO_2)_e$) [US\$/kWh]	0,1606	0,1140	0,1044	0,0994
H [h/ano]: 4380	k [anos]: 5	r [%]: 6		

Fonte: Elaboração própria

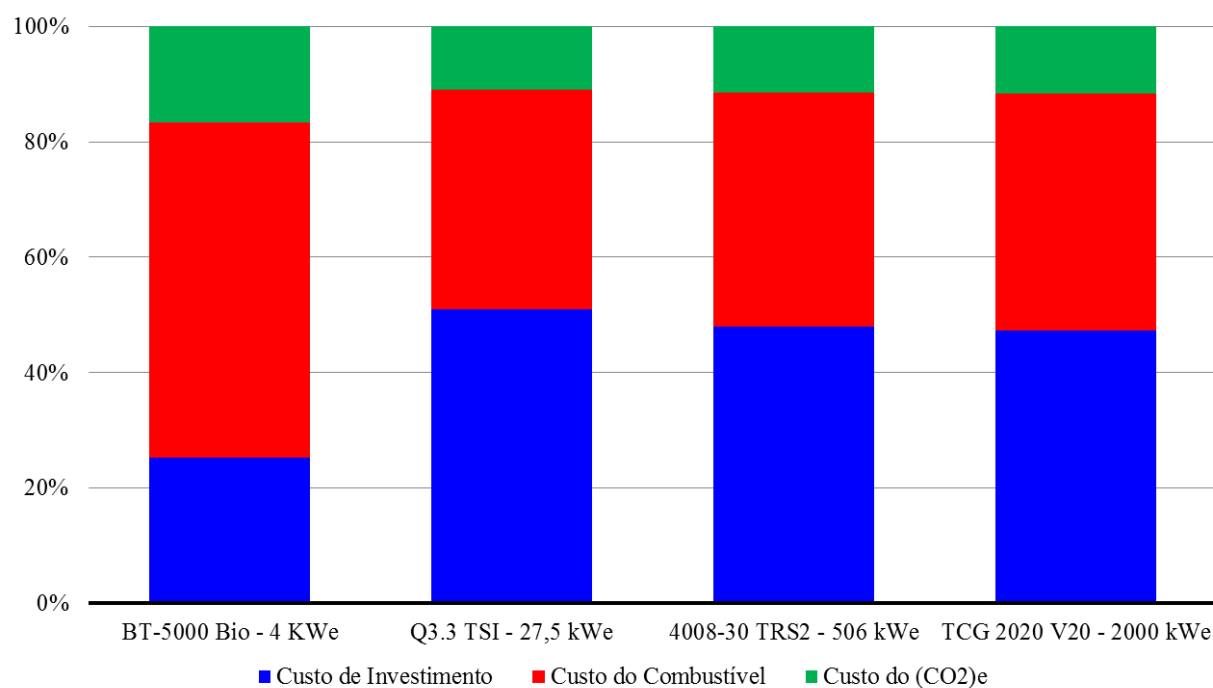
Dos dados da Tabela 40 pode-se notar que da mesma forma que para o método 1, o custo do CO_2 no sistema não é desprezível. Novamente nota-se que o sistema é mais penalizado pelas emissões quando consideradas as emissões de $(CO_2)_e$. À partir dos resultados obtidos, Tabela 40, pode-se quantificar a participação de cada parcela no custo de manufatura exergético, Figuras 37 e 38.

Figura 37: Composição do custo de manufatura exergetico considerando o CO2



Fonte: Elaboração própria

Figura 38: Composição do custo de manufatura exergetico considerando o (CO2)e



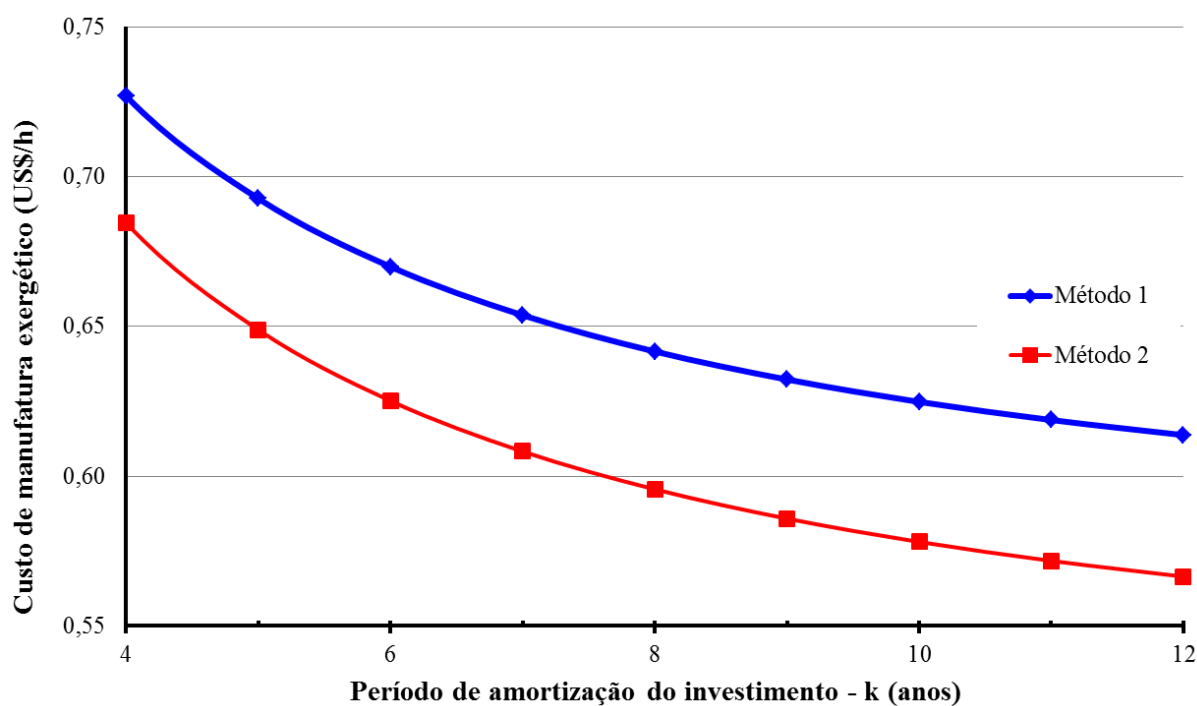
Fonte: Elaboração própria

4.4.1 Comparação dos métodos

De acordo com os trabalhos publicados por Silveira e Tuna, (2003 e 2004), o custo de manufatura exergético para ambos os métodos devem ser bastante próximos ou mesmo iguais.

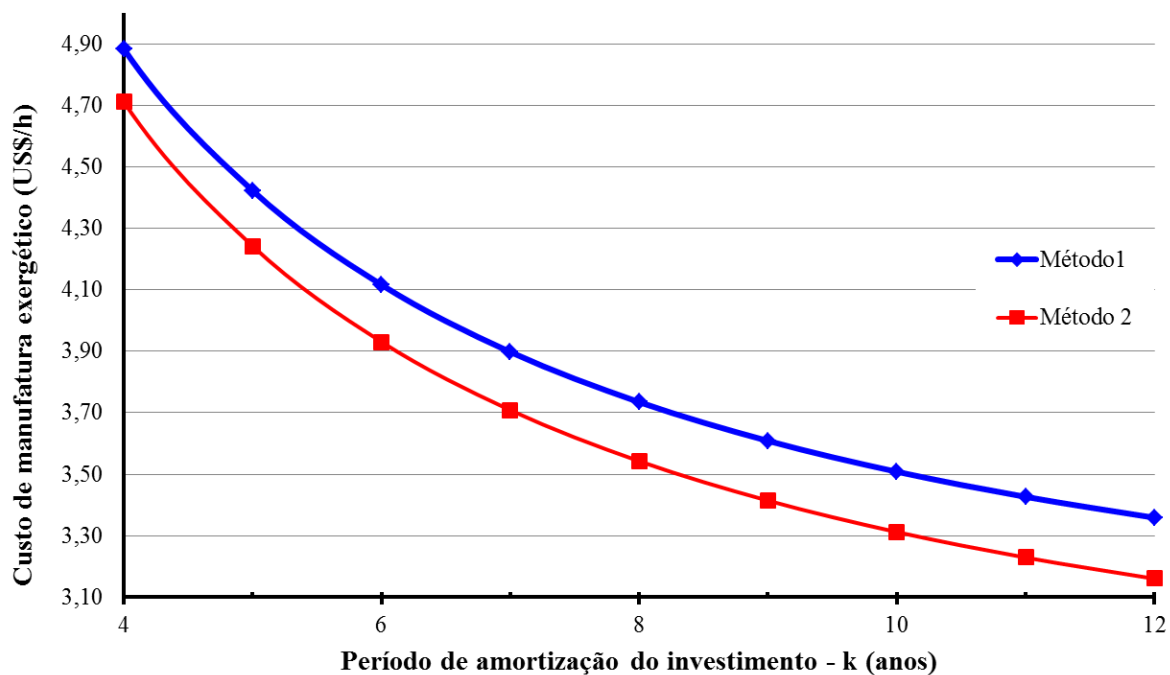
As Figuras 39 a 42 apresentam uma comparação do custo de manufatura exergético dos motores estudados para os dois casos considerando as emissões de $(CO_2)_e$.

Figura 39: Comparação dos dois métodos para o motor Branco BT-5000 bio



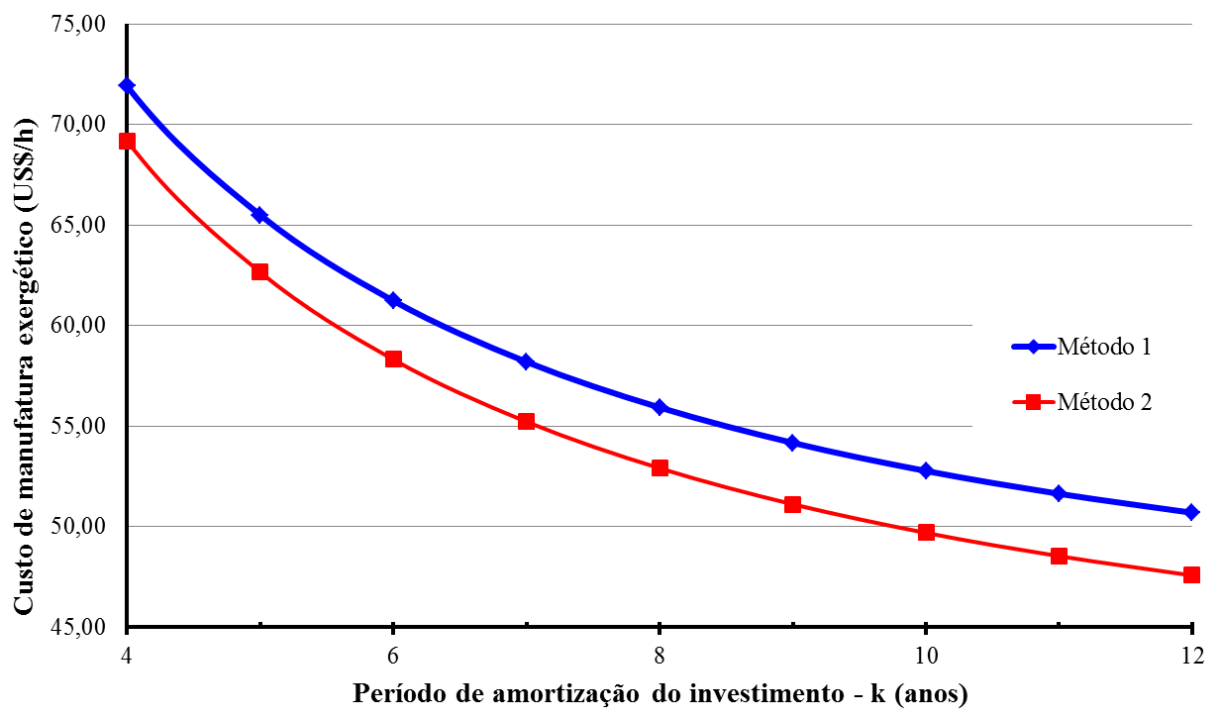
Fonte: Elaboração própria

Figura 40: Comparação dos dois métodos para o motor Quantum Q3.3 TSI - 27,5 kW_e



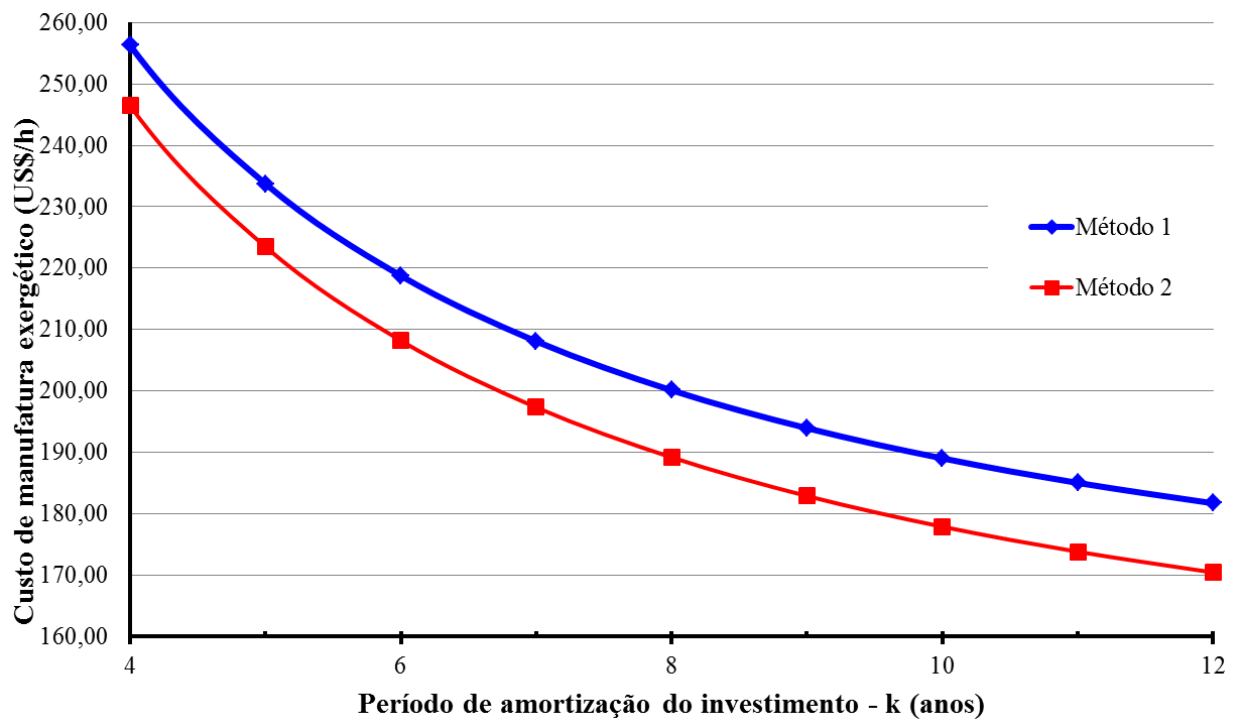
Fonte: Elaboração própria

Figura 41: Comparação dos dois métodos para o motor Perkins 4008-30 TRS2 - 506 kW_e



Fonte: Elaboração própria

Figura 42: Comparação dos dois métodos para o motor MWM TCG 2020 V20 - 2000 kWe



Fonte: Elaboração própria

Dessa comparação, conclui-se que para conjuntos estudados as curvas do custo de manufatura exergético para cada caso possuem uma pequena variação, coincidindo com o encontrado por Silveira e Tuna (2003 e 2004) para os métodos sem considerar o custo específico das emissões de CO₂.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

A análise energética do sistema de cogeração proposto permite concluir que a maior eficiência de geração elétrica foi obtida para o cenário de operação com 100% de carga. A Eficiência de produção de água quente manteve-se constante para qualquer um dos cenários, pois a quantidade de água quente produzida é diretamente proporcional ao fluxo de massa dos gases de escape e aos níveis de temperaturas envolvidos no processo de recuperação de calor residual do sistema.

A análise exergética do sistema indicou que o maior índice de irreversibilidade está associado ao conjunto motor de combustão interna e gerador elétrico, 18,8 kW no caso do conjunto BT-5000 bio.

O modelo termoeconômico proposto, aplicado à produção de eletricidade e água quente em motores de combustão interna utilizando biogás, mostrou ser uma ferramenta útil de análise para avaliar os níveis de investimento e condições operacionais dos sistemas. Do ponto de vista ambiental, verificou-se que o biogás é uma boa opção de combustível por permitir um valor de eficiência ecológica bastante elevada, 89% quando operado com carga plena.

Finalmente, a incorporação da emissão de CO_2 na formação do custo de manufatura exergético do sistema proposto permitiu o desenvolvimento de um novo modelo exergoeconômico-ambiental capaz de avaliar o quanto essas emissões oneram a operação do sistema. Os valores obtidos foram muito próximos nos dois métodos desenvolvidos, estando entre 4,9 % (2000 kWe) e 7,1 % (4 kWe) do custo de manufatura exergético total considerando as emissões de CO_2 e de 5,3 % a 7,5 % quando considerada a emissão de $(\text{CO}_2)_e$, para um custo de 10 US\$/t de carbono. Já para um custo de 20 US\$/t, tem-se uma variação de 9,4 % (2000 kWe) a 13,2 % (4 kWe) do custo de manufatura exergético total considerando as emissões de CO_2 e de 10,0 % a 14,0 % quando

considerada a emissão de $(\text{CO}_2)_e$. No caso do custo de 30 US\$/t, a influência foi de 13,5 % a 18,5 % e de 14,3 % a 19,6 %, respectivamente.

Conclui-se também, desse modo, que o impacto do custo das emissões não pode ser desprezado e que ambos os métodos são satisfatórios para essa análise.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Aplicação do método exergoeconômico-ambiental para outros tipos de plantas de cogeração;
- Análise econômica comparando a produção e armazenamento de biogás proveniente de diferentes fontes;
- Elaboração de programa de computador (software) capaz de simular os dois casos propostos para um mesmo equipamento;
- Estudar um índice de irreversibilidade para cada unidade ao invés de se utilizar o fator de ponderação.

REFERÊNCIAS

ADAM, A.; FRAGA, E. S.; BRETT, D. J. L.; "Modelling and Optimisation in Terms of CO₂ Emissions of a Solid Oxide Fuel Cell based Micro-CHP System in a Four Bedroom House in London," **Energy Procedia**, vol. 42, pp. 201-209, 2013.

AMESTOY, E. A.; FERREYRA, R. D. Utilização del biogas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE BIODIGESTION ANAEROBIA, 1987, Montevideo. Anais... Montevideo: **Comisión de Agroenergía**, FAO, 1987. 63 p.

ASM International, Handbook **Corrosion**, 1987, Ninth Edition, Volume 13.

BBC News (2010); **Oxfordshire town sees human waste used to heat homes** [Online]. Disponível em: <http://www.bbc.com/news/uk-11433162>

BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M.; **THERMAL DESIGN AND OPTIMIZATION**, JOHN WILEY AND SONS INC., USA (1996)

BNDES, Banco Nacional de Desenvolvimento; **Simulador BNDES** (2016), Disponível em:
http://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/simulador/?productCode=DESAG_010

BOEHM, F. R., **Desing analysis of thermal systems**. Editora John Weley & Sons, USA, 173p., (1987).

BOLOY, R. A. M.; **Análise Termoeconômica e Ecológica da Incorporação do Processo de Produção de Hidrôgeno em uma Planta de Produção de Biodiesel**. 2014. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

BRITO FILHO, L. F.; **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. 2005. 218f. Dissertação (Mestrado Ciências em Engenharia Civil)- Universidade federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2005

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**. Elsevier: 2014.

CARDU, M.; BAICA. M., 1999a Regarding a New Variant Methodology to Estimate Globally the Ecologic Impact of Thermopower Plants. **Energy Conversion and Management**, v.40, p. 1569-75

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/download/metodologiabiomassa.pdf>>. Acessado em: 26 maio de 2013

CHERNICHARO, C. A. L.; **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte : Ed. da UFMG, 1997

CHERNICHARO, C. A. L.; HAANDEL, A. Van; AISSE, M. M.; CAVALCANTI, P. F. F. Reatores anaeróbios de manta de lodo, In: CAMPOS, J.R. (Coord.) **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES/ PROSAB, 1999. p.155-98.

CORONADO, C. J. R.; DE CARVALHO JR, J. A.; YOSHIOKA, J. T.; SILVEIRA, J. L. Determination of ecological efficiency in internal combustion engines: The use of biodiesel. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 10, p. 1887–1892, 2009.

CORONADO, C. J. R.; **Análise Termoeconômica Da Produção De Biodiesel: Aspectos Técnicos, Econômicos E Ecológicos**. 171f. Tese De Doutorado Em Engenharia Mecânica. Faculdade De Engenharia Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

El-Sayed, Y.; **The Thermoeconomics of Energy Conversions**, Elsevier (UK), 2003

EPS System – Cogeneration Units (2016), Disponível em http://www.epssystem.pl/en/images/fermentacja_metanowa_angielska.pdf

ERLACH, B.; SERRA, L.; VALERO, A.; Structural theory as standard for thermoeconomics. **Energy Convers Manag** 1999.

FARIA, M. M. N.; **Análise de desempenho e simulação termodinâmica de um motor otto operando com biogás**/ Mário Márcio Nunes de Faria. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

FIGUEIREDO, N. J. V.; **Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás – estudo de caso**. Universidade Presbiteriana Mackenzie. Escola de Engenharia, Dpto. de Engenharia Mecânica. São Paulo, 2007

HOLMBERG, H.; TUOMAALA, M.; HAIKONEN, T.; AHTILA, P.; Allocation of fuel costs and CO₂-emissions to heat and power in an industrial CHP plant: case integrated pulp and paper mill. Appl **Energy** 2012.

INMETRO – Bombas e Motobombas (2015), Disponível em http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/bombas_motobombas.pdf

KASS, M.D.; THOMAS, J.F.; WILSON, D.; LEWIS, S.A.; SR., SARLES, S.A.; **ASSESSMENT OF CORROSIVITY ASSOCIATED WITH EXHAUST GAS RECIRCULATION IN A HEAVY-DUTY DIESEL ENGINE**. SAE PAPER 2005-01-0657, 2005, DOI:10.4271/2005-01-0657

KHAN U.; MAINALI B.; MARTIN A.; SILVEIRA S.; TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF SMALL SCALE BIOGAS BASED POLYGENERATION SYSTEMS: BANGLADESH CASE STUDY **SUSTAINABLE ENERGY TECHNOLOGIES AND ASSESSMENTS**, 7 (2014)

KOTAS, T. J., 1985; **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**, Krieger Publishing Company, Flórida, USA, 328p.

KRICH, K.; AUGENSTEIN, D.; BATMALE, J. P.; BENEMANN, J.; RUTLEDGE, B.; SALOUR, D.; **“Biomethane from Dairy Waste.” A Sourcebook for the Production and Use of Renewable Natural Gas in California**, (2005)

KRISTENSEN, P. G.; JENSEN, J. K.; NIELSEN, M.; ILLERUP, J. B.; **Emission factors for gas fired CHP units <25 MW**, Danish Gas Technology Centre, Horsholm (2004)

KUNT, B.; **Thermodynamic, economic and emissions analysis of a micro gas turbine cogeneration system operating on biofuels.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2016.

Land Instruments International Ltd, **Benefits of sulphuric acid dew point temperature monitoring**, 2011, 8p.

LEMBO, C.; GOLDEMBERG, J.; OKANO, O.; **Biogás: Pesquisas E Projetos No Brasil.** Cetesb, Secretaria do Meio Ambiente. Centro de Editoração da Secretaria de Meio Ambiente. São Paulo, 2006.

LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. **Biocombustíveis.** 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. v. 1.

MAINIER, F. B.; RAMOS, M. A.; **Estudo de corrosão em caldeira de navio transporte**, Rio de Janeiro, 1982.

MITZLAFF, K. Von.; **Engines for biogas.** Wiesbaden: Veiweg, 1988. 133 p

MKOMA, S. L.; MABIKI F. P.; Theoretical and practical evaluation of jatropha as energy source biofuel in Tanzania. In: BERNARDES, M. A. S. (Ed.). **Economic effects of biofuel production.** InTech, 2011. cap. 9. p. 181-200. Available at: <http://www.intechopen.com/> Acessado on 30 de abril 2015.

National Association of Clean Water Agencies (NACWA) (2009). **Renewable Energy Recovery Opportunities from Domestic Wastewater.** Disponível em <http://nacwa.org/wp-content/uploads/2015/02/Renewable-Energy-RecoveryOpportunities-from-Domestic-Wastewater-NACWA-10-2-09.pdf>

POUT, C.; HITCHIN, R.; Apportioning carbon emissions from CHP systems. **Energy Convers Manag**, 2005.

REIS, J. A.; **Projeto e Montagem de um Sistema Compacto de Cogeração Aplicação da Análise Exergoeconômica.** / Joaquim Antonio dos Reis.- Guaratinguetá, 2006.

SANTOS, J.; RIBEIRO, C.; FARIA, P.; DONATELLI J.; On the thermoeconomic modeling for CO₂ allocation in a simple back-pressure steam turbine cogeneration system. In: **International Congress on Energy and Environment Engineering and Management** Lisboa; 2013.

SANTOS, R. G.; FARIA, P. R.; SANTOS, J. J. C. S.; SILVA, J. A. M.; FLOREZ-ORREGO, D.; Thermoeconomic modeling for CO₂ allocation in steam and gas turbine cogeneration systems. **Energy**, 2016

SCHÜWER, D.; KRÜGER, C.; MERTEN, F.; NEBEL, A.; (2016) The potential of grid-orientated distributed cogeneration on the minutes reserve market and how changing the operating mode impacts on CO₂ emissions. In: **Energy**. RePEc:eee:energy:v:110:y:2016:i:c:p:23-33.

SHEN, V. K.; SIDERIUS, D. W., KREKELBERG, W. P.; AND HATCH, H.W.; Eds., **NIST Standard Reference Simulation Website**, NIST Standard Reference Database Number 173, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD, 20899, <http://doi.org/10.18434/T4M88Q> (link is external), acessado em 20 de abril de 2015.

SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E.; **Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power systems.** Part I. Progress in

Energy and Combustion Science, 743PM Times Cited:28 Cited References Count:11, v. 29, n. 6, p. 479–485, 2003.

SILVEIRA, J. L.; TUNA, CELSO EDUARDO, 2004; Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power system. Part II. **Progress in Energy and Combustion Science.** , v.30, p.673 - 678.

SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C.; VAN WYLEN, G. J.; **FUNDAMENTALS OF THERMODYNAMICS**, 6TH ED., JOHN WILEY: NEW YORK, 2003

SWEDISH GAS TECHNOLOGY CENTER. **Basic Data on Biogas**. 2nd ed. Lund: Serviceförvaltningen i Lunds kommun, 2012. 23 p.

SZARGUT, J.; MORRIS, D.R.; STEWARD, F.R.; 1988, **Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes**. New York: Hemisphere Publishing Co, 332 p.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S.; **Gestão integral dos resíduos sólidos**. 1 ed. Madri: McGraw-Hill, Inc, v(s).1-2, 1106p. (em Espanhol). 1994.

Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis –Under Executive Order 12866 (Agosto de 2016). Disponível em https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/omb/inforeg/scc_tsd_final_clean_8_26_16.pdf

TOPIĆ, D.; ŠLJIVAC, D.; SRETE, L. J.; VUKOBRATOVIĆ, N. M.; Cost-benefit Analysis of Biogas CHP Plant, Proc. of the 28th **Int. Conf. Science in Practice**, Subotica, Serbia, 3-4 June 2010, poster

TORRES, C.; SERRA L.; VALERO A.; LOZANO M. A.; The productive structure and thermoeconomic theories of system optimization. In: ME'96: **International Mechanical Engineering Congress & Exposition**; 1996.

TUNA, C. E.; 1999, **Um método de análise exergoeconômica para otimização de sistemas energéticos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 145p.

VAGAPOV, R. K.; FROLOVA, L. V.; KUZNETSOV, Y. I.; Inhibition Effect of Schiff Bases on Steel Hydrogenation in H₂S-Containing Media, **Protection of Metals**, 2002, vol 38, n°1.

VALERO, A.; TORRES, C.; **Thermoeconomic analysis**. Oxford UK: EOLSS Publishers; 2006. Disponível em <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C08/E3-19-02-00.pdf> Acessado em 15 de setembro de 2016

VILLELA, I.A.; SILVEIRA, J. L.; 2007, Ecological efficiency in thermoelectric power plants. **Applied Thermal Engineering**. v27, p 840-847.

VON SPAKOVSKY, MR.; Application of engineering functional analysis to the analysis and optimization of the cgam problem. **Energy** 1994.

WEG – **Alternadores Assíncronos** (2015) – Disponível em <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-alternadores-sincronos-linha-g-i-plus-50036341-catalogo-portugues-br.pdf>

WRESTA, A.; ANDRIANI, D.; SAEPUDIN, A.; SUDIBYO, H.; 2015. Economic analysis of cow manure biogas as energy source for electricity power generation in small scale ranch. **Journal Energy Procedia**, 122 – 131.

XAVIER, B. H.; **Aspectos termodinâmicos, ecológicos e econômicos de sistemas de cogeração com motores de combustão interna operando com gás natural, biogás e gás de síntese** / Beatriz Helene Xavier – Guaratinguetá, 2016.

ZANETTE, A. L.; **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**. Dissertação (mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Apêndice

As Tabelas 41 a 44 contidas nesse apêndice são os resultados completos obtidos por Faria, (2014) em seu experimento. O experimento consistiu em operar o conjunto motor-gerador com biogás proveniente de uma estação de tratamento de esgoto para analisar a geração de energia elétrica variando algumas condições de operação. Durante os testes, as emissões de poluente foram medidas, assim como o consumo de biogás e a potência elétrica gerada. Os dados selecionados de seu experimento para fomentar dados para esse trabalho foram

obtidos com o ponto de ignição do motor em sua graduação original e selecionadas as condições de maior produção elétrica e menor geração de CO. Para a carga no gerador em seu experimento, fora utilizado um chuveiro elétrico, variando assim a carga no gerador elétrico entre 25 % e 100%.

Tabela 41: Resultados para 25% de carga

CO	t	RPM	Pot _e	Emissões				Consumo	
				CO	CO ₂	HC	NO _x	O ₂ %	dm ³ /min
%	min	--	kW	%	%	ppm	ppm		
0,15	1	3624	0,908	0,10	14,5	18	134	1,4	36
	2	3630	0,915	0,13	14,7	16	131	1,5	36
	3	3612	0,908	0,11	14,6	12	137	1,6	36
	4	3612	0,915	0,10	14,5	14	138	1,5	36
	5	3636	0,908	0,13	14,6	14	135	1,5	36
0,50	1	3600	0,915	0,40	14,8	16	137	0,9	37
	2	3588	0,915	0,50	14,7	16	140	1,3	36
	3	3606	0,915	0,33	14,8	17	138	1,0	37
	4	3624	0,915	0,34	14,8	16	141	1,0	37
	5	3576	0,915	0,38	14,8	14	139	1,0	37
	1	3600	0,915	1,09	14,0	43	114	0,7	39

1,0	2	3588	0,915	1,44	14,5	35	124	0,8	39
	3	3606	0,915	0,90	14,7	26	130	0,8	38
	4	3624	0,915	0,90	14,7	29	128	0,8	38
	5	3576	0,915	1,00	14,6	24	129	0,8	38
1,5	1	3564	0,915	1,58	14,4	41	111	0,6	39
	2	3612	0,915	1,48	14,5	34	116	0,6	39
	3	3552	0,915	1,47	14,5	36	116	0,6	39
	4	3582	0,915	1,51	14,5	36	114	0,6	39
2,0	5	3570	0,915	1,51	14,4	39	115	0,6	39
	1	3462	0,915	2,02	14,4	44	106	0,4	40
	2	3486	0,915	2,06	14,3	46	103	0,4	40
	3	3486	0,915	2,01	14,3	47	104	0,4	40
2,5	4	3480	0,915	1,98	14,4	40	109	0,4	40
	5	3492	0,915	1,92	14,3	39	109	0,4	41
	1	3462	0,915	2,53	14,1	57	100	0,3	42
	2	3486	0,915	2,57	14,1	53	100	0,3	42
2,5	3	3486	0,915	2,51	14,1	49	100	0,3	42
	4	3480	0,915	2,51	14,1	52	97	0,3	43
	5	3492	0,915	2,53	14,1	50	100	0,3	43

Fonte: Faria, 2014

Tabela 42: Resultados para 50% de carga

CO	t	RPM	Pot _e	Emissões				Consumo	
%	min	--	kW	CO %	CO ₂ %	HC ppm	NOx ppm	O ₂ %	dm ³ /min
0,15	1	3582	2,202	0,14	14,7	26	301	0,9	45
	2	3594	2,172	0,13	14,9	25	303	1,1	46
	3	3588	2,202	0,18	14,8	24	307	1,0	46
	4	3582	2,202	0,13	14,8	25	320	0,9	46
	5	3600	2,202	0,18	14,9	23	302	1,0	46
0,50	1	3594	2,202	0,54	15,1	32	298	0,3	47
	2	3594	2,190	0,57	15,1	33	282	0,3	47
	3	3594	2,202	0,53	15,1	32	285	0,4	47
	4	3582	2,202	0,57	15,0	40	282	0,3	47
	5	3588	2,202	0,55	15,1	33	276	0,3	47
1,0	1	3588	2,202	0,98	14,9	40	259	0,2	49
	2	3582	2,202	1,03	14,9	41	261	0,2	48
	3	3582	2,202	0,90	15,0	38	262	0,2	48
	4	3606	2,202	0,95	14,9	38	268	0,2	48

1,5	5	3606	2,202	0,89	15,0	36	258	0,2	48
	1	3582	2,202	1,58	14,7	43	207	0,2	50
	2	3594	2,202	1,57	14,6	45	209	0,2	50
	3	3600	2,202	1,59	14,6	41	211	0,2	50
	4	3600	2,190	1,49	14,6	43	200	0,2	50
2,0	5	3624	2,190	1,64	14,6	47	196	0,2	50
	1	3600	2,190	1,98	14,4	48	175	0,2	52
	2	3582	2,202	2,17	14,3	50	183	0,2	52
	3	3588	2,202	2,00	14,3	49	179	0,2	52
	4	3600	2,202	2,14	14,3	49	184	0,2	52
2,5	5	3576	2,202	2,15	14,3	48	165	0,2	52
	1	3594	2,202	2,51	14,1	51	149	0,2	54
	2	3612	2,202	2,52	14,1	52	156	0,2	54
	3	3576	2,220	2,57	14,1	51	155	0,2	54
	4	3558	2,220	2,50	14,1	51	165	0,2	54
	5	3570	2,202	2,59	14,1	51	154	0,2	54

Fonte: Faria, 2014

Tabela 43: Resultados para 75% de carga

CO	t	RPM	Pot _e	Emissões				Consumo	
%	min	--	kW	CO %	CO ₂ %	HC ppm	NOx ppm	O ₂ %	dm ³ /min
0,15	1	3570	3,024	0,08	14,5	18	453	1,3	51
	2	3588	2,988	0,09	14,7	20	413	1,4	51
	3	3540	2,988	0,09	14,3	21	423	1,4	51
	4	3570	3,000	0,10	14,4	19	423	1,4	52
	5	3564	2,988	0,08	14,5	19	425	1,5	51
0,50	1	3594	3,000	0,59	15,0	30	395	0,3	53
	2	3594	2,988	0,58	15,1	30	403	0,3	53
	3	3606	2,964	0,54	15,1	30	399	0,3	53
	4	3606	2,988	0,49	15,1	32	397	0,3	53
	5	3612	2,976	0,45	15,1	31	392	0,3	53
	1	3534	3,000	1,10	14,9	94	297	0,2	54
	2	3558	3,012	1,18	14,8	77	306	0,2	54

1,0	3	3546	3,012	1,10	14,9	66	328	0,2	54
	4	3558	3,000	0,98	14,9	59	334	0,2	54
	5	3552	3,012	0,96	14,9	56	300	0,2	54
	1	3528	3,012	1,73	14,8	57	251	0,1	57
	2	3564	3,024	1,50	14,8	53	250	0,1	57
1,5	3	3540	3,012	1,60	14,7	55	250	0,1	57
	4	3558	3,000	1,59	14,8	53	250	0,1	57
	5	3582	3,000	1,60	14,6	55	239	0,1	57
	1	3576	3,024	2,05	14,5	56	197	0,1	59
	2	3552	3,036	2,08	14,5	56	198	0,1	59
2,0	3	3570	3,024	2,00	14,4	57	197	0,1	59
	4	3576	3,024	2,05	14,4	55	210	0,1	58
	5	3570	3,024	2,12	14,4	56	197	0,1	58
	1	3570	3,036	2,59	14,2	59	155	0,1	61
	2	3576	3,036	2,66	14,2	58	163	0,1	61
2,5	3	3546	3,036	2,68	14,2	59	152	0,1	61
	4	3546	3,012	2,67	14,2	59	150	0,1	61
	5	3558	3,012	2,68	14,2	58	156	0,1	61

Fonte: Faria, 2014

Tabela 44: Resultados para 100% de carga

CO	t	RPM	Pot _e	Emissões				Consumo	
				CO %	CO ₂ %	HC ppm	NO _x ppm	O ₂ %	dm ³ /min
0,15	1	3462	4,017	0,11	15,2	43	706	0,7	60
	2	3480	4,005	0,13	15,2	43	732	0,6	59
	3	3474	4,005	0,13	15,2	43	719	0,6	59
	4	3468	4,005	0,13	15,2	43	716	0,6	59
	5	3462	3,993	0,14	15,2	43	715	0,6	59
0,50	1	3504	3,993	0,54	15,2	53	582	0,2	61
	2	3498	3,993	0,60	15,3	53	586	0,2	61
	3	3486	3,993	0,56	15,3	54	590	0,2	61
	4	3486	3,993	0,50	15,3	55	568	0,2	61
	5	3486	3,993	0,60	15,3	54	565	0,2	61
1,0	1	3504	4,029	1,00	15,1	60	490	0,2	63
	2	3486	4,017	0,92	15,1	59	484	0,2	63
	3	3474	4,017	0,95	15,1	61	499	0,2	63

1,5	4	3498	4,017	0,94	15,1	62	484	0,2	63
	5	3486	4,017	0,97	15,1	58	507	0,2	63
	1	3480	4,017	1,57	14,9	64	387	0,2	64
	2	3498	4,005	1,48	14,9	65	380	0,2	64
	3	3504	4,017	1,47	14,9	65	401	0,2	64
2,0	4	3492	4,017	1,50	14,9	66	384	0,2	64
	5	3480	4,017	1,49	14,9	64	388	0,2	65
	1	3450	4,017	2,10	14,6	68	305	0,2	67
	2	3360	4,029	1,98	14,6	69	324	0,2	64
	3	3462	4,054	2,04	14,6	67	339	0,2	65
2,5	4	3528	4,017	1,90	14,7	66	360	0,1	66
	5	3492	3,933	1,90	14,7	63	338	0,1	64
	1	3474	3,920	2,40	14,6	59	270	0,1	67
	2	3462	3,908	2,60	14,2	60	200	0,1	67
	3	3468	3,920	2,51	14,3	63	254	0,1	66
	4	3468	3,920	2,46	14,3	64	256	0,1	67
	5	3444	3,920	2,40	14,4	64	276	0,1	67

Fonte: Faria, 2014