

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 20/12/2018.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ
Faculdade de Engenharia**

Lucas Fachini Vane

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

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
UITAU

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 exergetico em função do preço da tonelada de CO ₂ (método 1)	99
Figura 24: Composição do custo de manufatura exergetico considerando o CO ₂	102
Figura 25: Composição do custo de manufatura exergetico considerando o (CO ₂) _e	102
Figura 26: Diagrama funcional exergetico do ciclo de cogeração sem considerar as emissões equivalentes de CO ₂	104
Figura 27: Custo manufatura exergetico em função do período de amortização (método 2)....	113
Figura 28: Custo manufatura exergetico em função do período de amortização (método 2)....	113
Figura 29: Custo de manufatura exergetico em função do período de amortização, considerando as emissões de CO ₂ (método 2).....	115
Figura 30: Custo de manufatura exergetico em função do período de amortização, considerando as emissões de CO ₂ (método 2).....	115
Figura 31: Custo de manufatura exergetico em função do período de amortização, considerando as emissões de (CO ₂) _e (método 2)	117
Figura 32: Custo de manufatura exergetico 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 exergetica em função do preço da tonelada de CO ₂	121
Figura 36: Custo de manufatura exergetica em função do preço da tonelada de CO ₂	121
Figura 37: Composição do custo de manufatura exergetico considerando o CO ₂	124
Figura 38: Composição do custo de manufatura exergetico 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]
$Inv_{\text{BOMBA}_2/\text{TC}_2}$	Investimento no trocadores de calor 2 e bomba 2 [US\$]
$Inv_{\text{BOMBA}_1/\text{TC}_1}$	Investimento no trocadores de calor 1 e bomba 1 [US\$]
$Inv_{\text{MOTOR}/\text{GERADOR}}$	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}_{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}_{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]
$PCI_{\text{biogás}}$	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
Π_{aq}	Eficiência de produção de água quente [-]
Π_{el}	Eficiência de geração de energia elétrica [-]
Π_g	Eficiência global do sistema [-]
n_{H_2S}	Massa de H ₂ S no combustível por massa de combustível [kg _{H2S} /kg _{comb}]
Π_t	Eficiência térmica [-]
Π_{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 cogeraçao.....	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	Eficiencia exergetica do ciclo de cogeraçao.....	64
CAPÍTULO 3 – EFICIÊNCIA ECOLÓGICA		66
3.1.1	Análise de emissões da queima de biogás	70
3.1.2	Cálculos da eficiencia ecológica do sistema de cogeraçao	72
CAPÍTULO 4 – DESENVOLVIMENTO DE MODELO EXERGOECONÔMICO-AMBIENTAL.....		75
4.1.2	Determinaçao 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 produçao de energia elétrica pelo método 1	84
4.2.3	Custo específico da produçao de água quente pelo método 1	87
4.2.4	Fator de ponderaçao pela exergetia 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 produçao de energia elétrica pelo método 2.....	108
4.3.3	Custo específico produçao 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).

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 CO₂ 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 CO₂ e de 5,3 % a 7,5 % quando considerada a emissão de (CO₂)_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 CO₂ e de 10,0 % a 14,0 % quando

considerada a emissão de $(CO_2)_e$. 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 Agroenergia**, 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 Hidrogênio 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 Thermoconomics 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 thermoconomics. **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; Thermo-economic 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.; **Gestión 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.