



unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

REGINA FRANCIÉLLE SILVA PAULINO

**USO DO BIOGÁS PARA PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO:
ELETRÓLISE VERSUS REFORMA A VAPOR**

Guaratinguetá
2017

REGINA FRANCIÉLLE SILVA PAULINO

USO DO BIOGÁS PARA PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO:
ELETRÓLISE VERSUS REFORMA A VAPOR

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

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

Guaratinguetá
2017

P328
u

Paulino, Regina Franciélle Silva

Uso do biogás para produção de biohidrogênio: eletrólise versus
reforma a vapor / Regina Franciélle Silva – Guaratinguetá, 2017.

111 f : il.

Bibliografia: f. 101-109

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade
de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

1. Biogás. 2. Energia elétrica e calor – cogeração. 3. Eletrólise.

I. Título

CDU 536.72(043)

REGINA FRANCIÉLLE SILVA PAULINO

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE 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. JOSÉ LUZ SILVEIRA
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. JULIO SANTANA ANTUNES
UNESP-FEG


Prof. Dr. EDERALDO GODOY JUNIOR
UITAU

Março de 2017

DADOS CURRICULARES

REGINA FRANCIÉLLE SILVA PAULINO

NASCIMENTO	28.04.1989 – IGUAATEMI / MS
FILIAÇÃO	José Maria Paulino Maria Conceição Silva Paulino
2009/2014	Curso de Graduação Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá Universidade Estadual Paulista.

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

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que me iluminou e guiou os meus passos para que pudesse realizar meus sonhos e alcançar meus objetivos.

Agradeço aos meus pais José Maria Paulino e Maria Conceição Silva Paulino, por sempre me apoiarem, pela confiança, carinho e orações, e por estarem sempre presentes na minha vida. Essa conquista é nossa.

Aos meus irmãos Renivaldo Silva Paulino e Reginaldo Silva Paulino, pelo apoio, amizade, incentivo e irmandade.

A todos os familiares que acompanharam a minha batalha e me incentivaram.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Luz Silveira, pela oportunidade de fazer parte do Grupo e poder desenvolver pesquisas no Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos (LOSE) e no Instituto de Pesquisa em Bioenergia IPBEN – UNESP - Guaratinguetá, e também pela amizade, apoio, incentivo e orientação para que esta dissertação fosse concluída.

E Por fim, agradeço aos alunos de iniciação científica, Pedro Andrade e ao Gabriel Nóbrega, que me auxiliaram na revisão bibliográfica. A todos amigos do LOSE, IPBEN que de alguma forma colaboraram para que minha pesquisa fosse concluída, que com certeza serão para toda vida.

“Cada sonho que você deixa para trás, é um pedaço do seu futuro que deixa de existir.”

Steve Jobs

PAULINO, R. F. S., Uso do Biogás para Produção de Biohidrogênio: Eletrólise Versus Reforma a Vapor.. 2017. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

RESUMO

Neste trabalho são estudados dois processos que utilizam biogás para obtenção do biohidrogênio. Inicialmente é analisado o processo de eletrólise da água, com o uso de energia elétrica gerada em conjunto motor de combustão interna/gerador (MCI) operando com biogás de aterro sanitário. Visando aproveitamento de calor dos gases de escape do MCI estuda-se o potencial de geração de energia térmica útil pela aplicação da técnica de cogeração. Considera-se dois casos: o primeiro para a produção de água quente em um trocador de calor, e o segundo, para a produção de água gelada em um sistema de refrigeração por absorção. Posteriormente é estudada a reforma a vapor de biogás para a produção de biohidrogênio, que utiliza também esse biocombustível para a geração de vapor superaquecido necessário ao processo de reforma. O objetivo é efetuar a análise energética de modo a determinar as eficiências dos processos, o potencial de produção de biohidrogênio, água quente ou água gelada, nos aterros sanitários da cidade de São Paulo. Também é efetuada análise de engenharia econômica para a determinação do custos da produção de biohidrogênio, água quente e água gelada, em US\$/kWh. Esse estudo baseia-se em parâmetros tais como, investimento capital, custos de manutenção e operação dos equipamentos, período equivalente de utilização e período de amortização de capital. Em fase final, foram realizados estudos de impactos ambientais para a determinação das eficiências ecológicas dos processos de produção de biohidrogênio (reforma a vapor e eletrólise), considerando as emissões de poluentes, o dióxido de carbono equivalente e os indicadores de poluição. Como conclusões, tem-se que considerando a disponibilidade de biogás da cidade de São Paulo, existe potencial para a produção de biohidrogênio, e que o processo de reforma a vapor do biogás apresenta maior nível de eficiência sob o ponto de vista termodinâmico. Quando se considera a eletrólise incorporando a técnica da cogeração com a produção simultânea de eletricidade e água quente ou água gelada, observa-se aumento da eficiência energética do processo. A reforma a vapor do biogás, também se mostra mais atrativa economicamente de acordo com os parâmetros considerados. Sobre o ponto de vista ambiental, o processo de eletrólise com produção de água gelada apresenta maior eficiência ecológica, seguidos do processo de produção de água quente, reforma a vapor e somente eletrólise.

PALAVRAS-CHAVE: Biohidrogênio Renovável, Biogás, Eletrólise, Reforma a Vapor, Cogeração, Água quente, Água Gelada, Análise Energética, Análise Econômica, Análise Ecológica.

PAULINO, R. F. S., Use of Biogas for Hydrogen Production: Electrolysis versus Steam Reform. 2017. 111f. Dissertation (Masters in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

ABSTRACT

In this work is studied two processes to obtain hydrogen using biogas. Initially is analyzed the process of electrolysis of water, with the use of electricity generated in conjunction with an internal combustion engine / generator (ICE) operating with landfill biogas. generated by an internal combustion engine/generator operating with landfill biogas, is analyzed. In order to take advantage of the exhaust gases from the combustion of biogas, the potential of cogeneration is studied, another two cases are considered. The first one studies the production of hot water in the heat exchanger and the second analyzes the use of absorption refrigeration system to produce cold water. Subsequently it is studied the steam reform of biogas for the production of hydrogen, which is constituted of biogas burning for the generation of superheated steam used in the conversion of the fuel input. The objective is to make the energy analysis in order to determine the efficiency of the processes and the potential of producing hydrogen, hot water or ice water in the landfills of the city of São Paulo using the biogas generated. An economic engineering analysis to determine the production hydrogen cost, hot water and ice water, in US\$/kWh, based on capital investment, maintenance and operation costs, equivalent period of use and payback. In the final phase, environmental study method is applied to determine the ecological efficiencies of the hydrogen production processes using biogas, considering the emissions of pollutants, carbon dioxide equivalent and pollution indicator. As a conclusion, considering the hydrogen production capacity and the biogas availability of the city of São Paulo, the process of steam reforming of the biogas is more thermodynamically efficient. When considering the electrolysis incorporating the cogeneration technique with the simultaneous production of electricity and hot water or cold water, it is observed an increase in the energy efficiency of the process. The steam reform of the biogas is more attractive economically according to the considered parameters. From the environmental point of view, the process of electrolysis with the production of cold water presents greater ecological efficiency, followed by the process of hot water production, steam reforming and only electrolysis.

KEYWORDS: Renewable Hydrogen, Biogas, Electrolysis, Steam Reforming, Cogeneration, Hot Water, Cold Water, Energetic Analysis, Economic Analysis, Ecological Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma dos processos de obtenção do biohidrogênio.....	24
Figura 2: Etapas da biodigestão anaeróbica de substratos orgânicos	26
Figura 3: Biodigestor modelo Indiano.....	29
Figura 4: Biodigestor modelo Chinês.....	29
Figura 5: Biodigestor modelo batelada.....	30
Figura 6: Sistema empregado para eletrólise da água.....	33
Figura 7: Eletrolisador monopolar.....	35
Figura 8: Eletrolisador bipolar.....	35
Figura 9: Fluxograma do processo de eletrólise	39
Figura 10: Fluxograma do processo de eletrólise: produção de biohidrogênio e água quente.....	44
Figura 11: Fluxograma do potencial de cogeração: produção de biohidrogênio e água gelada	48
Figura 12: Fluxograma do processo de reforma a vapor	51
Figura 13: Produção de água quente de acordo com a temperatura	55
Figura 14: Eficiências energéticas dos processos	58
Figura 15: Capacidade total de produção de biohidrogênio em função do processo utilizado	59
Figura 16: Metodologia para determinação do custo de investimento de eletrolisador	63
Figura 17: Metodologia para determinação do custo de investimento de MCI/Gerador	65
Figura 18: Metodologia para determinação do custo de investimento de SRA	71
Figura 19 : Custo de produção de biohidrogênio por eletrólise, em função do payback, para MCI 43,1%	75
Figura 20: Custo de produção de biohidrogênio por eletrólise, em função do payback, para MCI 26,5%	76
Figura 21: Receita anual esperada em função do preço de venda de biohidrogênio (produção de 600 Nm ³ /h).	77
Figura 22: Receita anual esperada em função do preço de venda de biohidrogênio (produção total de 7.287,28 Nm ³ /h).	78
Figura 23: Custo de produção de biohidrogênio (potencial de Cogeração: Produção de H ₂ e água quente), em função payback, para MCI 43,1%	79
Figura 24: Custo de produção de biohidrogênio (potencial de Cogeração: Produção de H ₂ e Água Quente), em função payback, para MCI 26,5%	80

Figura 25: Custo de produção de água quente em função do payback, MCI 43,1%.....	81
Figura 26: Custo de produção de água quente em função do payback, MCI 26,5%.....	82
Figura 27: Custo de produção de biohidrogênio (potencial de Cogeração: Produção de H ₂ e Água Gelada), em função payback e do custo do biogás, para MCI 43,1%	83
Figura 28: Custo de produção de biohidrogênio (potencial de Cogeração: Produção de H ₂ e Água Gelada), em função payback e do custo do biogás, para MCI 26,5%	84
Figura 29: Custo de produção de água gelada, em função do payback e do custo do biogás, MCI 43,1%	85
Figura 30: Custo de produção de água gelada, em função do payback e do custo do biogás, MCI 25,6%	86
Figura 31: Custo de produção de biohidrogênio por reforma a vapor, em função do período de amortização e do custo do biogás.....	87
Figura 32: Receita anual esperada em função do preço de venda de biohidrogênio (produção de 600 Nm ³ /h).	88
Figura 33: Receita anual esperada em função do preço de venda de biohidrogênio (produção de 32688,51 Nm ³ /h).	89
Figura 34: Custo de produção do biohidrogênio considerando os diferentes processos	90
Figura 35: Comparação da receita anual esperada para a produção total de biohidrogênio dos três aterros no processo de eletrólise e reforma a vapor.....	91
Figura 36: Comparação da eficiência ecológica dos processos.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Produção de biogás dos aterros sanitários da cidade de São Paulo	38
Tabela 2: Características do eletrolisador selecionado para os estudos	40
Tabela 3: Características do motor de combustão interna a biogás modelo CG 260-16 (60 Hz)	41
Tabela 4: Diferença entálpica, entalpia de formação e massa molar.....	42
Tabela 5: Resultados da análise energética do processo de eletrólise (somente Biohidrogênio)	53
Tabela 6: Capacidade de produção de biohidrogênio dos aterros da cidade de São Paulo	54
Tabela 7: Resultados do potencial de cogeração: produção de biohidrogênio e água quente..	54
Tabela 8: Potencial de cogeração: produção de biohidrogênio e água gelada	56
Tabela 9: Características do sistema de refrigeração por absorção	56
Tabela 10: Resultados da análise energética do processo de reforma a vapor do biogás.....	57
Tabela 11: Capacidade de produção de biohidrogênio dos aterros da cidade de São Paulo	57
Tabela 12: Custo dos eletrolisadores	62
Tabela 13: Custo de motores de combustão interna	65
Tabela 14: Custo de sistema de refrigeração por absorção (SRA)	70
Tabela 15: Emissões de CO₂ , NO_x , SO₂ e MP da queima do biogás no MCI	95
Tabela 16: Resultado do dióxido de carbono equivalente, indicador de poluição e eficiência ecológica.....	95
Tabela 17: Emissões de CO₂ , NO_x , SO₂ e MP da queima do biogás na caldeira	96
Tabela 18: Resultado do dióxido de carbono equivalente, indicador de poluição e eficiência ecológica.....	97
Tabela 19: Resultados da análise ecológica	97

LISTADE SÍMBOLOS

C	Custo do equipamento para uma grandeza de interesse S	[US\$]
$C_{biogás}$	Custo do biogás	[US\$/kWh]
$C_{el_{MCI}}$	Custo de eletricidade produzida no motor de combustão interna	[US\$/kWh]
$C_{eletrolisador}$	Custo do eletrolisador	[US\$]
C_{GN}	Custo do gás natural	[US\$/kWh]
$C_{H_2eletrólise}$	Custo de produção de biohidrogênio a partir da eletrólise	[US\$/kWh]
$C_{H_2reforma}$	Custo de produção de biohidrogênio a partir da reforma a vapor	[US\$/kWh]
$C_{H_2O,g}$	Custo de produção de água gelada	[US\$/kWh]
$C_{H_2O,q}$	Custo de produção de água quente	[US\$/kWh]
$C_{manCald}$	Custo de manutenção da caldeira	[US\$/kWh]
$C_{man_{eletrolisador}}$	Custo de manutenção do eletrolisador	[US\$/kWh]
$C_{man_{MCI}}$	Custo de manutenção do motor de combustão interna	[US\$/kWh]
$C_{man_{reformador}}$	Custo de manutenção do reformador	[US\$/kWh]
$C_{man_{TC}}$	Custo de manutenção do trocador de calor	[US\$/kWh]
$C_{man_{SRA}}$	Custo de manutenção do sistema de refrigeração por absorção	[US\$/kWh]
$Cop_{eletrolisador}$	Custo de operação do eletrolisador	[US\$/kWh]
Cop_{TC}	Custo de operação do trocador de calor	[US\$/kWh]
Cop_{SRA}	Custo de operação do sistema de refrigeração por absorção	[US\$/kWh]
$Cop_{reformador}$	Custo de operação do reformador	[US\$/kWh]
COP	Coeficiente de desempenho do SRA	[-]

c_{p_a}	Calor específico a pressão constante da água	[kJ/kg.K]
c_{p_g}	Calor específico a pressão constante dos gases	[kJ/kg.K]
$c_{p_{m,g}}$	Calor específico a pressão constante médio dos gases	[kJ/kg.K]
C_r	Custo do equipamento para uma grandeza de referência S_r	[US\$]
C_{vapor}	Custo do vapor para o processo de reforma	[US\$/kWh]
$(CO_2)_e$	Dióxido de carbono equivalente	[kg/ kgcomb]
$\dot{E}_{biogás}$	Potência fornecida pela queima biogás	[kW]
$\dot{E}_{biogás.cald}$	Potência fornecida pela queima do biogás na caldeira	[kW]
$\dot{E}_{biogásMCI}$	Potência fornecida pela queima do biogás no motor de combustão interna	[kW]
$E_{req.}$	Eletricidade requerida no eletrolisador	[kW]
$E_{req.aterro}$	Eletricidade requerida no aterro sanitário	[kW]
$\dot{E}_{H_2}$	Potência suprida pelo biobiohidrogênio	[kW]
E_p	Potência elétrica produzida no motor de combustão interna	[kW]
f	Fator de anuidade	[1/ano]
$FP_{ele.g}$	Fator de produção de eletricidade (eletrólise: H_2+H_2O gelada)	[-]
$FP_{ele.q}$	Fator de produção de eletricidade (eletrólise: H_2+H_2O quente)	[-]
FP_g	Fator de produção de água quente (eletrólise: H_2+H_2O quente)	[-]
FP_{ref}	Fator de produção de água gelada (eletrólise: H_2+H_2O gelada)	[-]
H	Período equivalente de utilização	[h/ano]
H_p	Entalpia do produto da combustão	[kJ/kmol]

H_R	Entalpia do reagente na combustão	[kJ/kmol]
I_{MCI}	Investimento no motor de combustão interna	[US\$]
$Inv_{eletrolisador}$	Investimento no eletrolisador	[US\$]
$Inv_{reformador}$	Investimento no reformador a vapor	[US\$]
Inv_{TC}	Custo de investimento do trocador de calor	[US\$]
Inv_{SRA}	Custo de investimento do sistema de refrigeração por absorção	[US\$]
$\dot{m}_{biogásMCI}$	Fluxo mássico de biogás no motor de combustão interna	[kg/s]
k	Período de amortização (payback)	[anos]
m	Fator de incidência que indica a escala de economia	[0,5 – 1,0]
m_{H_2}	Capacidade de produção de biohidrogênio em	[Nm ³ /h]
$\dot{m}_a$	Fluxo de água no trocador de calor	[kg/s]
$\dot{m}_{biogás.Cald.}$	Consumo de biogás na caldeira	[kg/s]
$\dot{m}_{biogásMCI}$	Consumo de biogás no motor de combustão interna	[kg/s]
$\dot{m}_{biogás.ref.}$	Fluxo mássico de biogás no reformador	[kg/s]
$\dot{m}_g$	Fluxo mássico de gases de exaustão do motor	[kg/s]
$\dot{m}_{H_2}$	Fluxo mássico de biobiohidrogênio produzido	[kg/s]
$\dot{m}_{H_2O}$	Fluxo mássico de água no eletrolisador e reformador	[kg/s]
$\dot{m}_{vapor}$	Fluxo mássico de vapor no reformador	[kg/s]
M_{CO_2}	Emissão de dióxido de carbono	[kg _{CO₂} /kgcomb]
M_{NO_x}	Emissão de dióxido de nitrogênio	[kg _{NO_x} /kgcomb]
M_{MP}	Emissão de material particulado	[kg _{MP} /kgcomb]
$MM_{biogás}$	Massa molar do biogás	[kmol/kg]

P_{H_2O}	Tarifa de água	[US\$/m ³]
$PCI_{biogás}$	Poder calorífico inferior do biogás	[kJ/kg]
PCI_{H_2}	Poder calorífico inferior do biohidrogênio	[kJ/kg]
$P_{v.el.exc.}$	Preço de venda de eletricidade excedente	[US\$/kWh]
P_{vH_2}	Preço de venda de biohidrogênio	[US\$/kWh]
Q_a	Fluxo de calor entregue á água no trocador de calor	[kW]
Q_g	Fluxo de calor residual disponível nos gases de escape no trocador de calor	[kW]
Q_{ger}	Potência térmica fornecida pelos gases de exaustão ao SRA	[kW]
Q_{ref}	Capacidade térmica do SRA de produção de água gelada	[kW]
r	Taxa de anual de juros	[%]
$T(K)$	Temperatura	[K]
$T_{e,a}$	Temperatura da água na entrada do trocador de calor	[K]
$T_{e,g}$	Temperatura dos gases na entrada do trocador de calor	[K]
$T_{e,ger}$	Temperatura dos gases de exaustão na entrada do SRA	[K]
$T_{s,a}$	Temperatura da água na saída do trocador de calor	[K]
$T_{s,g}$	Temperatura dos gases na saída do trocador de calor	[K]
$T_{s,ger}$	Temperatura dos gases de exaustão na saída do SRA	[K]
$\dot{W}_{MCI}$	Potência elétrica produzida no motor de combustão interna	[kW]

ε	Eficiência ecológica	[-]
λ	Relação ar/combustível	[-]
Π_g	Indicador de poluição	[kg/MJ]
$\eta_{Cald.}$	Eficiência da caldeira	[-]
$\eta_{eletro.el.MCI}$	Eficiência energética do processo de eletrólise	[-]
$\eta_{eletrolisador}$	Eficiência do eletrolisador	[-]
$\eta_{el.MCI}$	Eficiência elétrica do motor de combustão interna	[-]
$\eta_{gaterro}$	Eficiência global dos insumos produzidos no aterro	[-]
$\eta_{reforma}$	Eficiência energética do processo de reforma a vapor do biogás	[-]
η_{sistem}	Eficiência energética do processo de produção de biohidrogênio	[-]
Δh_{vapor}	Variação de entalpia específica na caldeira	[kJ/kg]

SUMÁRIO

4

Capítulo 1. INTRODUÇÃO.....	21
1.1. Considerações Iniciais	21
1.2. Estrutura da Dissertação	21
1.3. Objetivos.....	23
Capítulo 2. ASPECTOS TÉCNICOS DO USO DE BIOGÁS PARA PRODUÇÃO DE BIOBIOHIDROGÊNIO POR ELETRÓLISE E REFORMA A VAPOR.....	24
2.1. Biohidrogênio	24
2.2. Biogás	26
2.2.1 Biodigestores	28
2.2.2 Biogás de aterros sanitários	30
2.3. Aspectos técnicos do uso do biogás para produção de biohidrogênio por eletrólise.....	32
2.3.1 Eletrolisadores	34
2.4. Aspectos técnicos da produção de biohidrogênio por reforma a vapor do biogás.....	37
Capítulo 3. ANÁLISE ENERGÉTICA.....	38
3.1 Análise Energética do Processo de Eletrólise	39
3.1.1Eletrolisador.....	40
3.1.2 Motor de Combustão Interna a Biogás	41
3.2 Potencial de Cogeração	43
3.2.1 Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Quente	44
3.2.2 Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Gelada	48
3.2 Análise Energética do Processo de Reforma a Vapor	50
3.3 Resultados da Análise Energética	53
3.3.1 Resultados da Análise Energética do Processo de Eletrólise	53
3.3.2 Resultados do Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Quente ...	54
3.3.2 Resultado do Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Gelada	56
3.4.2 Resultado da Análise Energética do Processo de Reforma a Vapor do Biogás	57

Capítulo 4. ANÁLISE ECONÔMICA.....	60
4.1 Análise Econômica do Processo de Eletrólise (somente produção de Biohidrogênio) ...	61
4.1.2 Análise Econômica do Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Quente por Eletrólise.....	67
4.1.3 Análise Econômica do Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Gelada por Eletrólise.....	69
4.2 Análise Econômica do Processo de Reforma a Vapor do Biogás	72
4.3.1 Resultados da Análise Econômica do Processo de Eletrólise	75
4.3.1.1 Resultados da Análise Econômica do Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Quente.....	79
4.3.1.2 Resultados da Análise Econômica do Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Gelada	83
4.3.2 Resultado da Análise Econômica do Processo de Reforma a Vapor do Biogás	87
Capítulo 5. ANÁLISE ECOLÓGICA.....	92
5.1 Dióxido de Carbono Equivalente	92
5.2 Indicador de Poluição.....	93
5.3 Eficiência Ecológica	94
5.4 Análise Ecológica do Processo de Eletrólise e Potencial de Cogeração	94
5.5 Análise Ecológica do Processo de Reforma a Vapor do Biogás	94
5.6 Resultados da análise Ecológica	95
5.6.1 Resultado da Análise Ecológica do Processo de Eletrólise.....	95
5.6.1.2 Resultado da Análise Ecológica do Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Gelada	96
5.6.3 Resultado da Análise Ecológica para Comparação dos Processos.....	97
Capítulo 6. CONCLUSÕES.....	99
REFERÊNCIAS	101

Capítulo 1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

A matriz energética brasileira é bastante diversificada, com grande capacidade de produção de combustíveis fósseis e renováveis. Atualmente, um grande desafio para os cientistas e pesquisadores é o desenvolvimento de novas tecnologias para que fontes alternativas de energias sejam exploradas de forma mais ampla em benefício da população e do meio ambiente. Neste contexto, pesquisas relacionadas aos processos de obtenção do hidrogênio tem se tornado constante, pois este vetor energético possui grande capacidade de armazenamento de energia, e se produzido a partir de fontes renováveis poderá ser um combustível economicamente e ecologicamente estratégico para que o Brasil dependa menos do petróleo e de outros combustíveis fósseis (BRAGA et al. (2013), ACAR et al. (2013)).

Atualmente, a maior porcentagem de produção de hidrogênio ocorre por refinação de hidrocarbonetos. Porém, a produção por processos químicos e eletroquímicos revela-se pouco sustentável do ponto de vista do balanço energético, dada a quantidade de energia gasta para produzi-lo e armazená-lo (Das e Veziroglu, 2001). Então, sugere-se o uso de energias renováveis para obtenção do hidrogênio, para que diminua as emissões de poluentes e se torne uma fonte de energia viável e atrativa. Entre as sugestões estão o processo de eletrólise da água com eletricidade proveniente da queima biogás num motor de combustão interna e reforma a vapor do biogás.

Neste trabalho são efetuados estudos energéticos, econômicos e ecológicos dos processos de eletrólise da água e de reforma a vapor, utilizando o biogás como fonte de energia.

1.2. Estrutura da Dissertação

Este trabalho de Dissertação foi dividido em seis capítulos, os quais são descritos resumidamente a seguir.

- Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma introdução sobre o assunto estudado, a estrutura do trabalho e seus objetivos.

- Capítulo 2 – ASPECTOS TÉCNICOS DO USO DE BIOGÁS PARA PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO POR ELETRÓLISE E REFORMA A VAPOR

Este capítulo refere-se aos estudos dos aspectos técnicos do processo de eletrólise da água funcionando com eletricidade gerada com a queima do biogás em conjunto motor de combustão interna e da reforma a vapor do biogás para produção de biohidrogênio.

- Capítulo 3 - ANÁLISE ENERGÉTICA

Este capítulo apresenta análise termodinâmica para determinar a eficiência energética de cada processo, a fim de comparar o processo mais viável tecnicamente.

- Capítulo 4 - ANÁLISE ECONÔMICA

Neste capítulo é efetuada análise econômica dos processos em estudo, a fim de determinar os custos de investimentos, operação, manutenção e produção de biohidrogênio (em US\$/kWh em função do tempo de amortização do capital investimento) de cada processo, para determinar o processo mais viável.

- Capítulo 5 - ANÁLISE ECOLÓGICA

Neste capítulo são determinadas as eficiências ecológicas dos processos de produção de biohidrogênio, baseando-se nos CO₂ equivalentes e indicadores de poluição, com a finalidade de indicar o processo mais viável ecologicamente.

- Capítulo 6 - CONCLUSÕES

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

1.3. Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é estudar os processos de eletrólise da água e de reforma a vapor do biogás, efetuando análises energética, econômica e ecológica.

Têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Comparar a eficiência energética dos processos.
- Determinar o custo de produção do biohidrogênio em US\$/kWh nos processos estudados e comparar a viabilidade econômica dos mesmos.
- Calcular a eficiência ecológica da eletrólise da água e da reforma a vapor do biogás, determinando o processo ecologicamente mais viável.

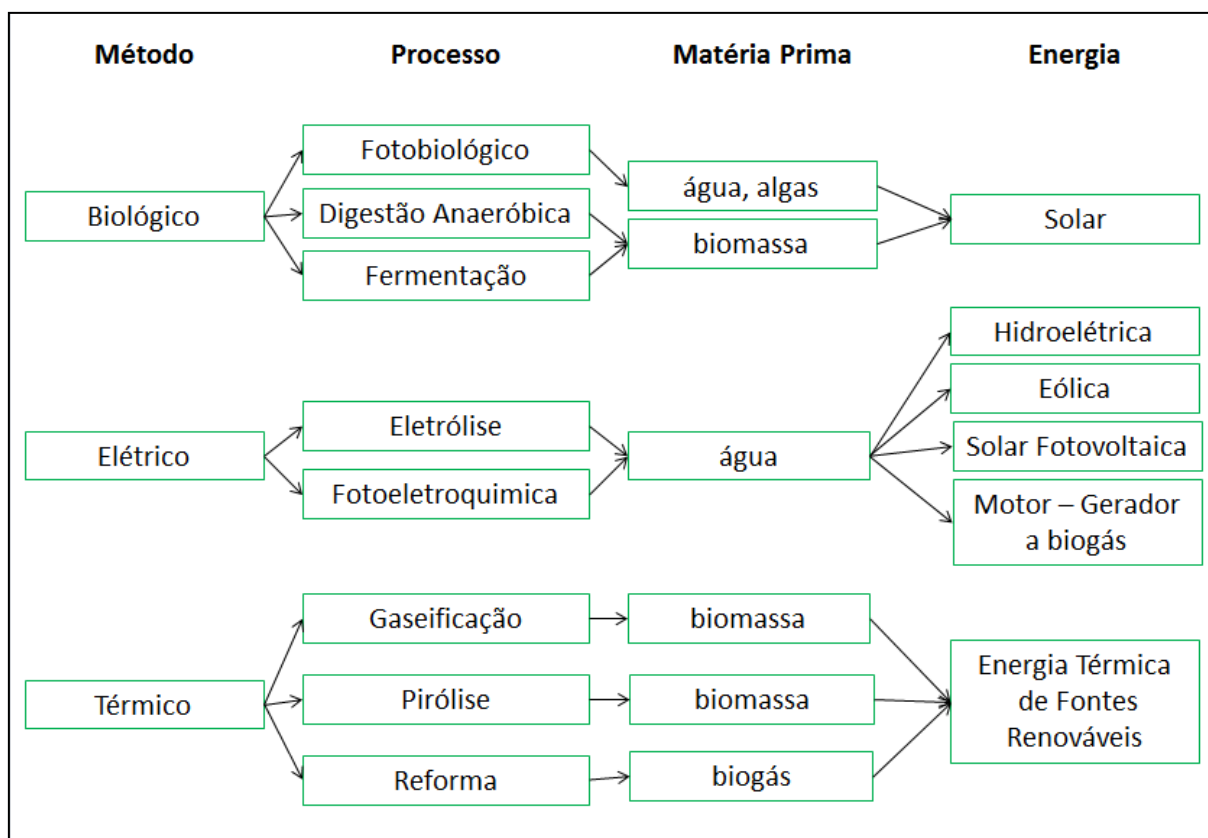
Capítulo 2. ASPECTOS TÉCNICOS DO USO DE BIOGÁS PARA PRODUÇÃO DE BIOBIOHIDROGÊNIO POR ELETRÓLISE E REFORMA A VAPOR

2.1. Biohidrogênio

O hidrogênio é o elemento mais leve e de maior abundância no mundo, em seu estado natural é incolor e inodoro. No universo, o hidrogênio é encontrado associado a outros elementos químicos, como por exemplo, oxigênio, carbono e nitrogênio, presentes na água, seres vivos e combustíveis fósseis. Desta forma, não é uma fonte primária de energia, mas se torna um vetor energético de grande potencial quando separado dos outros elementos químicos (ACAR et al., 2013).

O biohidrogênio é obtido através de fontes alternativas de energia. As energias térmica e elétrica utilizadas nos processos podem ser: solar, hídrica, eólica, eletricidade da queima de biogás em motor de combustão interna e biomassa. A Figura 1 apresenta os métodos, processos, matéria prima e energia utilizadas para obter o biohidrogênio.

Figura 1: Fluxograma dos processos de obtenção do biohidrogênio



Fonte: adaptado Acar et al., 2013.

- Método Biológico:

- Fotobiológico: Para que se obtenha biohidrogênio a partir de mecanismos fotobiológico são necessários microrganismos expostos à energia solar. Estes microrganismos podem ser cianobactérias ou algas verdes, que produzem biohidrogênio através da biofotólise da água (GOMES et al., 2012).

- Digestão anaeróbia: consiste na conversão microbiológica de substratos orgânicos a metano e dióxido de carbono, através de associações simbióticas entre diferentes grupos de bactérias (AMARAL, 2017).

- Fermentação: O processo de fermentação é anaeróbio, realizado por determinados microrganismos, durante o qual ocorre a oxidação/degradação de compostos orgânicos, em outros mais simples e consequente à produção de biohidrogênio (GOMES et al., 2012).

- Método Elétrico

- Eletrólise: No processo de eletrólise o biohidrogênio é obtido pela decomposição da água, em biohidrogênio e oxigênio, por passagem de eletricidade através de condutores eletrolíticos.

- Fotoeletroquímico: Neste processo o biohidrogênio é produzido a partir de água, usando a luz solar e semicondutores especializados chamados materiais fotoeletroquímicos, que precisam de energia da luz para dissociar diretamente as moléculas de água em biohidrogênio e oxigênio (OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY, 2016).

- Método Térmico

- Gaseificação: O processo de gaseificação transforma a biomassa em gás de síntese, em seguida, o dióxido de carbono é separado e o biohidrogênio é extraído (DINCER, 2012).

- Pirólise: No processo de eletrólise o biohidrogênio é obtido através da decomposição química das matérias orgânicas, por aquecimento na ausência de oxigênio ou de quaisquer outros reagentes, exceto, vapor (DIRK GERLACH ENFINEER, 2016).

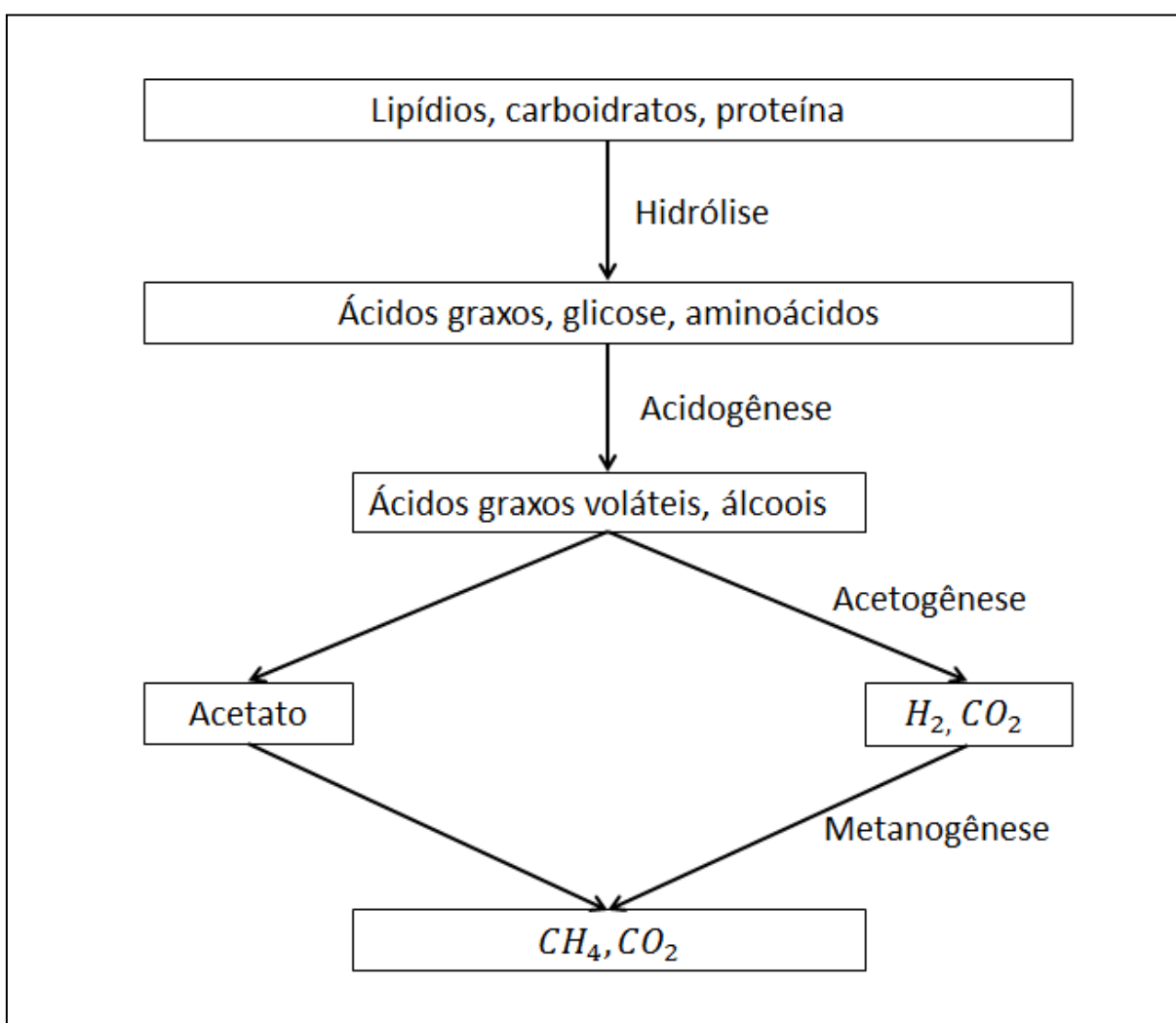
- Reforma a vapor: A reforma é um processo que utiliza mais de uma etapa catalítica, é endotérmico e consiste na conversão catalítica da mistura vapor d'água e hidrocarboneto ou álcool em biohidrogênio (SILVA, 2010).

2.2. Biogás

O biogás é produto da ação digestiva de microrganismo do tipo Arqueas, e é composto principalmente, por gás carbônico (CO_2) e metano (CH_4), embora apresente traços de nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2) e gás sulfídrico (H_2S). Ele se forma através da decomposição de matéria orgânica (biomassa) em condições anaeróbicas (GASPAR, 2003).

O processo de biodigestão anaeróbica de substratos orgânicos ocorre em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Estas etapas são apresentadas na Figura 2.

Figura 2: Etapas da biodigestão anaeróbica de substratos orgânicos



Fonte: adaptado de Zhang et al. (2014)

De acordo com Kumar et al. (2013), as etapas mostradas na Figura 2 são descritas da seguinte maneira:

- A hidrólise é a primeira etapa para o processo de biodigestão anaeróbica. Os lipídios, carboidratos e proteínas são hidrolisados, por enzimas extracelulares, em moléculas orgânicas solúveis tais como açúcares, aminoácidos, ácidos graxos.
- No processo de acidogênese, as moléculas solúveis são utilizadas pelas bactérias na fermentação anaeróbica ou oxidante, resultando em ácidos graxos voláteis e álcoois.
- O processo de acetogênese é necessário, pois os produtos do processo de acidogênese não podem ser utilizados diretamente no processo de metanogênese. Logo, os ácidos graxos e álcoois são oxidados e transformados em acetato, biohidrogênio e dióxido de carbono.
- Na etapa da metanogênese, o acetato, biohidrogênio e dióxido de carbono são transformados em metano e dióxido de carbono por microrganismo do tipo Arqueas.

De acordo com Komiyama et al. (2006), o uso do biogás como fonte alternativa de energia reduz as emissões dos gases de efeito estufa, como metano e dióxido de carbono.

Chernicharo (2007) apresenta os seguintes fatores que podem afetar a eficiência da produção de biogás:

a) Composição química do resíduo: substâncias orgânicas facilmente biodegradáveis, como os carboidratos, proteínas e lipídeos, proporcionam maior produção de metano que as substâncias de difícil degradabilidade, como celulose, lignina e compostos artificiais.

b) Impermeabilidade ao ar: as Arqueas produtoras de metano são anaeróbias. A decomposição da matéria orgânica na presença de oxigênio produzirá apenas dióxido de carbono (CO₂).

c) Temperatura: a temperatura tem uma influência muito grande no processo enzimático das Arqueas produtoras de metano, visto que a 10 °C a atividade dos microrganismos é muito baixa e acima de 65 °C as enzimas são destruídas pelo calor. A faixa ideal para a produção de biogás está entre 32 e 37 °C, para bactérias mesofílicas, e de 50 a 60 °C, para bactérias termofílicas.

d) Produção e consumo de ácidos orgânicos: o valor de pH durante a biodigestão anaeróbia está ligado à produção de ácidos graxos e a degradação de seus compostos em metano. Quando as condições ótimas de digestão anaeróbia são prejudicadas, ocorre um aumento na concentração de ácidos voláteis, consequência de um desequilíbrio do processo.

e) pH: as Arqueas que produzem o metano têm um crescimento ótimo numa faixa de pH entre 6,6 e 7,4. Contudo, a estabilidade da produção de metano pode ser mantida com um pH entre 6,0 e 8,0. A faixa de pH ótima é o resultado das diversas reações que ocorrem. Caso o

processo se mantenha dentro das condições de normalidade, o pH se manterá próximo à neutralidade, não afetando a eficiência da geração de biogás.

f) Alcalinidade: a alcalinidade é importante, pois, conforme as bactérias produzem ácidos e dióxido de carbono, implicando na diminuição do pH, o carbonato/bicarbonato consomem esses ácidos, impedindo grandes flutuações de pH (efeito tampão). Quando a quantidade de ácidos voláteis presentes é pequena, a alcalinidade total é, praticamente, igual à alcalinidade em bicarbonato. Quando os ácidos voláteis aumentam, eles são neutralizados pela alcalinidade em bicarbonato.

g) Acidez: a acidez do meio está diretamente relacionada com o pH e com a alcalinidade. Uma alta produção e acúmulo de ácidos voláteis pode consumir rapidamente a alcalinidade do meio e causar a redução do pH.

h) Nutrientes: os principais nutrientes para as populações microbianas, em ordem decrescente de importância, são: nitrogênio, enxofre, fósforo, ferro, cobalto, níquel, molibdênio, selênio, riboflavina e vitamina B12. Via de regra, para resíduos de animais não é necessário fazer suplementação de nutrientes para a biodigestão anaeróbia.

2.2.1 Biodigestores

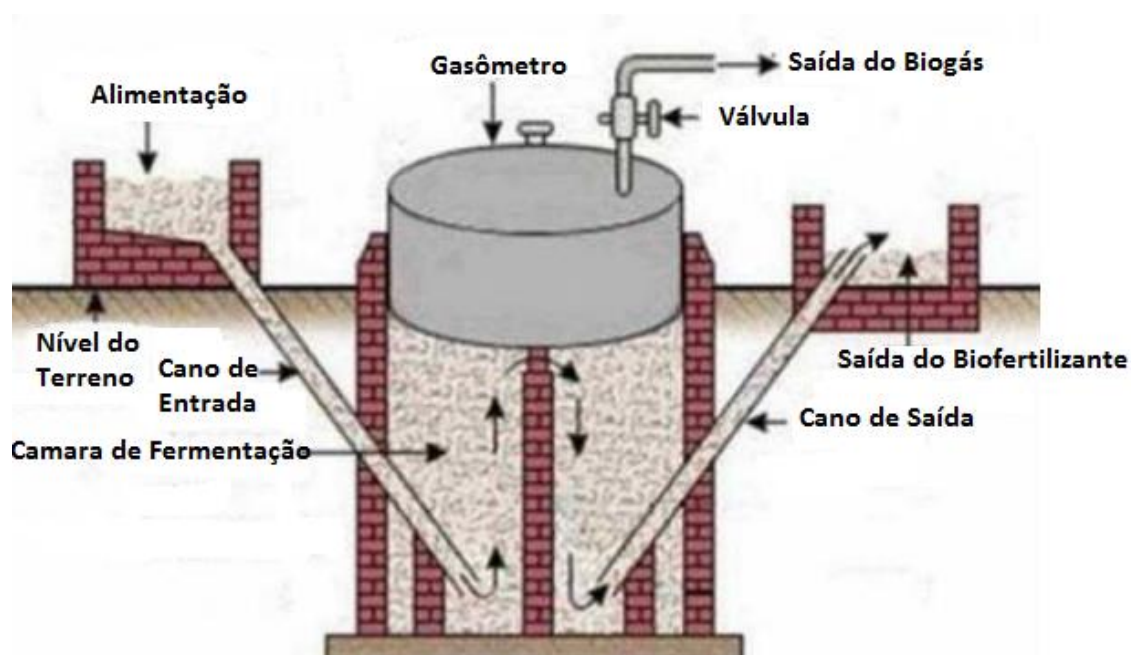
O biogás pode ser produzido através da utilização de um equipamento denominado biodigestor. Este é constituído de uma câmara fechada onde é depositado o material orgânico, em solução aquosa, e de um gasômetro onde é acumulado o biogás produzido (DEGANUTTI et al., 2002).

Os biodigestores podem ser classificados de acordo com a forma de abastecimento:

- Contínuos: modelo indiano e chinês
- Não Contínuos: modelo batelada

De acordo com Sganzerla (1983) *apud* Gaspar (2003), o modelo indiano é o mais usado no Brasil devido à sua funcionalidade. Sua construção é em formato de um poço, local onde ocorre a digestão da biomassa, coberto por uma tampa cônica (gasômetro). Através do gasômetro flutuante é controlada a pressão do gás metano e realizada a regulação da emissão do mesmo. A Figura 3 apresenta o biodigestor modelo Indiano.

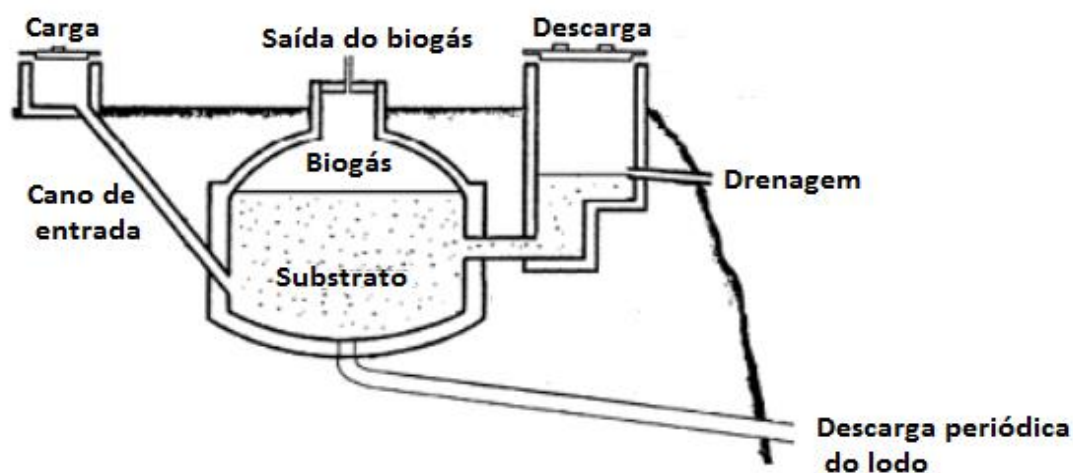
Figura 3: Biodigestor modelo Indiano



Fonte: Fonseca et al. (2009)

O modelo chinês é mais rústico e completamente construído em alvenaria, ficando quase que totalmente enterrado no solo. Funciona, normalmente, com alta pressão, a qual varia em função da produção e consumo do biogás e possui uma câmara de regulação, a qual permite trabalhar com baixa pressão (GASPAR, 2003). A Figura 4 mostra o biodigestor modelo Chinês.

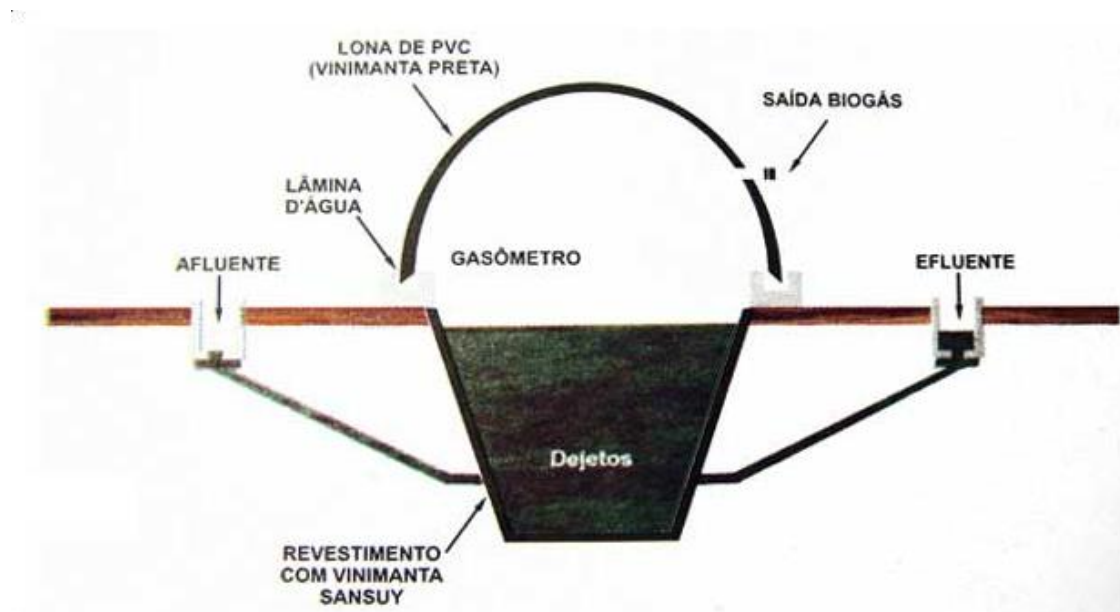
Figura 4: Biodigestor modelo Chinês



Fonte: Manual Biodigestor Winrock (2009)

O biodigestor modelo batelada trata-se de um sistema bastante simples e de pequena exigência operacional. Sua instalação pode ser apenas um tanque anaeróbio, ou vários tanques em série. Esse tipo de biodigestor é abastecido de uma única vez, portanto não é um biodigestor contínuo, mantendo-se em fermentação por um período conveniente, sendo o material descarregado posteriormente após o término do período efetivo de produção de biogás (DEGANUTTI et al., 2002). Na Figura 5 é apresentado o biodigestor modelo batelada.

Figura 5: Biodigestor modelo batelada



Fonte: Sustentabilidade Tecnológica (2016)

2.2.2 Biogás de aterros sanitários

A disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, uma prática muito utilizada, é uma fonte de emissão de metano para a atmosfera. Este gás tem uma contribuição significativamente maior que o dióxido de carbono na retenção do calor na atmosfera e consequente o aumento do aquecimento global (efeito estufa). Estudos recentes indicam que o poder de poluição do metano é 21 vezes maior do que o do dióxido de carbono (MARINHO e SOUSA, 2010).

A utilização do biogás como combustível para geração de energia elétrica não apenas aproveita de forma sustentável este subproduto da disposição dos resíduos sólidos, como também evita que o gás metano nele contido seja emitido para a atmosfera (VAN ELK, 2007).

De acordo com Ministério de Minas Energia (2016), um aterro de resíduos sólidos pode ser considerado como um reator biológico, onde são depositados resíduos e água, e extraído gases e chorume.

Segundo Jaffrin et al. (2003), o biogás gerado dentro aterros é o resultado de um processo de fermentação de passos múltiplos:

- Fase aeróbia: A fase aeróbia ocorre quando os resíduos sólidos urbanos começam a ser depositados nos aterros sanitários e os componentes orgânicos sofrem reações bioquímicas através de uma fermentação aeróbica por uma combinação de bactérias, fungos, leveduras e algas, produzindo dióxido de carbono e vapor de água.

- Fase anaeróbica: A fase anaeróbica começa quando os resíduos estão confinados sob uma camada de solo para evitar que odores e sólidos sejam transportados pelo vento. Esta fase é tripla:

- (a) inicialmente, a matéria orgânica é hidrolisada por uma classe de bactérias que produzem ácidos graxos voláteis, álcoois, dióxido de carbono e biohidrogênio;

- (b) em seguida ocorre a acetogênese, onde bactérias transformam os produtos anteriores em o ácido acético, o dióxido de carbono e biohidrogênio;

- (c) finalmente, outras classes de bactérias transformam ácido acético em metano, por um lado, e, em seguida pelo outro, hidrogênio e dióxido de carbono em metano.

Themelis e Ulloa (2007), apresentam as reações de acetogênese e metanogênese demonstradas na equação (1) e, (2) e (3), respectivamente.

- Acetogênese:



- Metanogênese:



A quantidade máxima de biogás que pode ser gerado durante a decomposição anaeróbia é determinada a partir da fórmula molecular aproximada, apresentada na equação (4) (THEMELIS e ULLOA, 2007).



De acordo com Mello e Grassi (2014), o aproveitamento do biogás produzido em aterros sanitários para geração de energia elétrica compreende nas seguintes etapas: extração e tratamento do biogás, a implantação de um sistema de queima em *flares* e a utilização de um motor-gerador ou turbina para conversão do combustível em eletricidade.

Mazo Nix (s/d) apud Santos (2015), afirma que a forma mais usual de extração do biogás de aterros é utilizando extratores verticais. Estes são instalados, a 10 metros de profundidade dos resíduos, nas zonas de despejo ou operação. Também, podem utilizar coletores horizontais, que são instalados em áreas superficiais ou de pequenas profundidades e é uma boa alternativa para aterros com altos níveis de chorume.

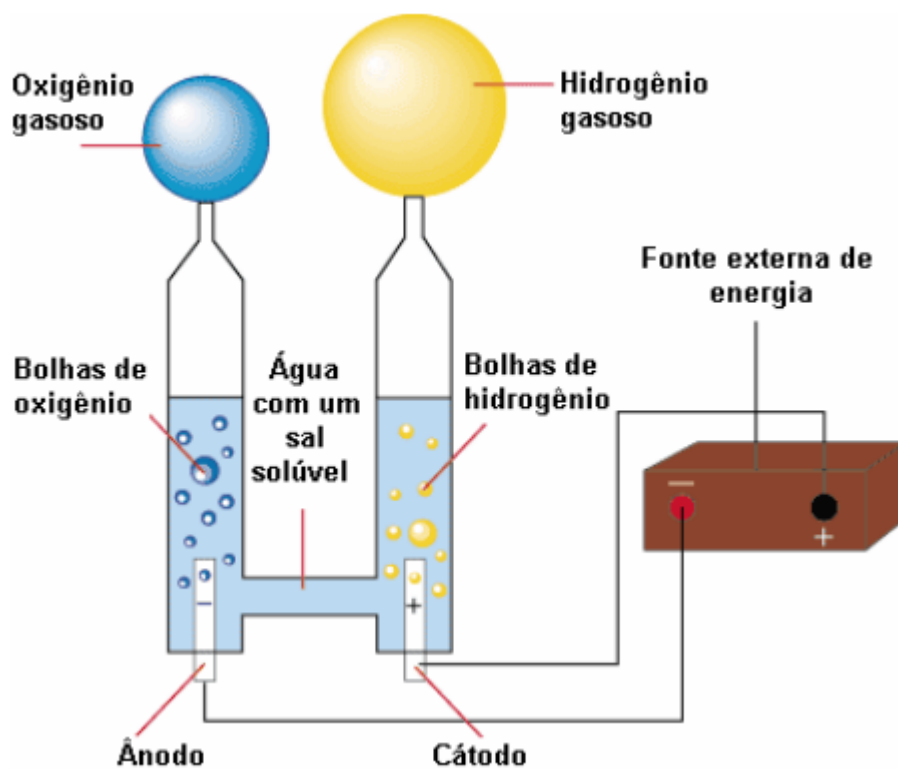
Segundo Zanette (2009), o tratamento do biogás é necessário para atender as especificações de cada aplicação (geradores, caldeiras, veículos), aumentar o poder calorífico e padronizar o gás. Os principais elementos que podem requerer remoção em um sistema de tratamento são: ácido sulfídrico (H₂S), água (H₂O), dióxido de carbono (CO₂) e compostos halogenados. Frare (2006), afirma que estes elementos fazem o biogás ser menos eficiente, e que o ácido sulfídrico é responsável pela corrosão precoce de equipamentos (motor, câmara de combustão, caldeira), diminuindo o rendimento dos mesmos. Logo, mesmo o H₂S existindo em um pequeno percentual no biogás deve ser removido para aumento da eficiência e vida útil dos equipamentos.

2.3. Aspectos técnicos do uso do biogás para produção de biohidrogênio por eletrólise

O biohidrogênio produzido por eletrólise da água baseia-se na passagem de uma corrente elétrica através de um condutor eletrolítico (alcalino ou polimérico), que resulta na separação da molécula de água em biohidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂). O biohidrogênio produzido por este processo é de qualidade elevada, uma vez que não são gerados carbono, enxofre ou compostos azotados. O processo de eletrólise é livre de poluição quando analisado somente as reações, mas as emissões do ciclo de vida é uma função direta da fonte

de eletricidade usada no processo (LEVIN et al., 2010). A Figura 6 mostra o fluxograma do processo de eletrólise.

Figura 6: Sistema empregado para eletrólise da água



Fonte: LONGO et al. (2016)

Segundo Botton (2007), a eletrólise pode ser simplificada com as seguintes reações nos eletrodos:

Cátodo:



Anodo:



Global:

De acordo Botton (2007), a produção de hidrogênio pelo processo de eletrólise da água é simples, por não precisar passar por muitas etapas, no entanto possui a desvantagem de ser um sistema de alto custo.

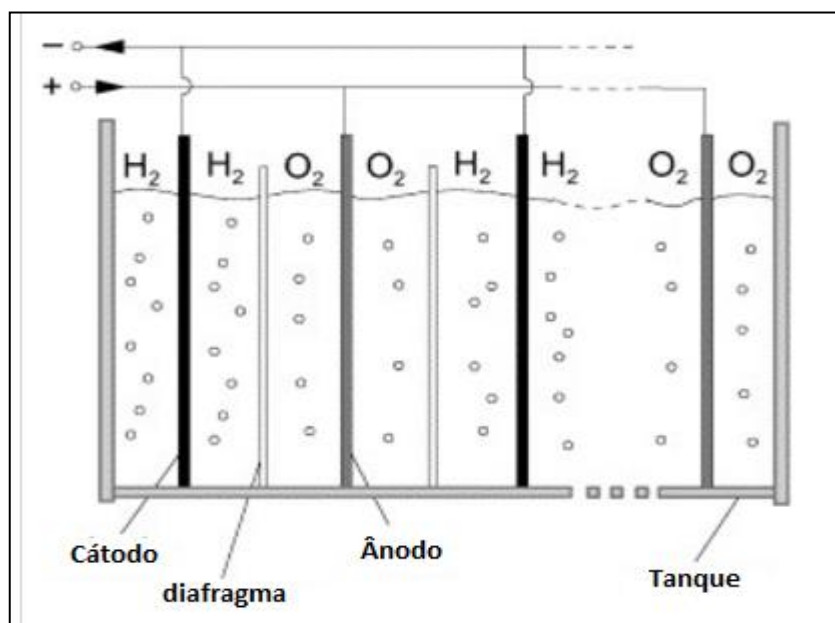
Este processo tem alto custo devido a grande quantidade de eletricidade necessária para que ocorram as reações. Os pesquisadores tomaram como desafio tornar esse processo economicamente viável e ecologicamente correto. Pesquisas estão sendo desenvolvidas em busca de novas fontes alternativas de energia que possam ser utilizadas neste processo. Uma das opções a ser considerada é a geração de eletricidade através da queima de biogás no motor de combustão interna.

2.3.1 Eletrolisadores

Os eletrolisadores convencionais utilizam eletrólitos alcalinos, uma solução de hidróxido de potássio aquoso (KOH), principalmente com concentração de 20-30%, devido a ótima condutividade e resistência à corrosão. As temperaturas e pressões normais de funcionamento destes eletrolisadores são 70-100 °C e 1 – 30 bar, respectivamente (WENDT e PLZAK (1991) apud ULLEBERG (2003)).

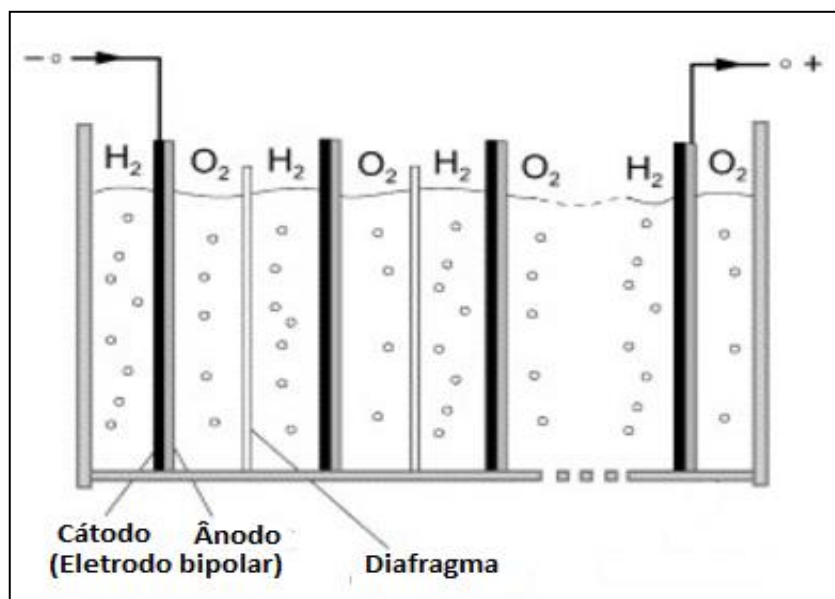
Segundo Ulleberg (2003), fisicamente os eletrolisadores são compostos por várias células ligadas em série e podem ser: monopolar e bipolar. No mopolar a estrutura do eletrodo terá apenas uma polaridade e são ligados em paralelo, conforme Figura 7. O bipolar possui a estrutura do eletrodo de um lado o cátodo e do outro o anodo, conforme Figura 8.

Figura 7: Eletrolisador monopolar



Fonte: Ulleberg (2003)

Figura 8: Eletrolisador bipolar



Fonte: Ulleberg (2003)

Os eletrolisadores monopolares possuem construção mais simples e manutenção mais fácil que os bipolares, resultando num menor custo por unidade de área na célula. Esses eletrolisadores são geralmente usados para produção de H_2 de até $100\text{Nm}^3/\text{h}$. Já os eletrolisadores bipolares são usados geralmente para produção de H_2 acima de $100\text{Nm}^3/\text{h}$ (CARNIELETTO, 2011 apud BRAGA, 2014).

2.3.2 Motor de combustão interna a biogás

O biogás pode ser usado diretamente em motores estacionários modificados e em alguns casos é necessária a purificação do combustível (FIGUEIREDO, 2011).

Os motores de ciclo Otto podem ser facilmente modificados para utilizar biogás, pois esse tipo de motor é projetado para utilizar uma mistura de ar e combustível com ignição por faísca. A principal alteração é no fornecimento de combustível à câmara de combustão, assim, o carburador do motor que utiliza combustível líquido é substituído por uma válvula do tipo borboleta. Essa válvula irá controlar a admissão de biogás na câmara de combustão. A transformação de um motor Otto, que utiliza gasolina para biogás, terá como consequência uma produção de energia inferior do que quando operado à gasolina. Isso ocorre porque a eficiência volumétrica, quando se usa biogás, é inferior à da gasolina. Essa redução é devida ao fato de que a gasolina possui um poder calorífico e uma massa específica superiores ao do biogás, assim, em um mesmo volume, a mistura gasolina e ar possui maior energia que a mistura de biogás e ar. (MIHIC, 2004 apud MACHADO e WANDER, 2015).

A ottolização é um processo pelo qual o biogás é introduzido a motores de ciclo Diesel. Para sua realização, remove-se a parte de injeção do diesel e adiciona-se em seu lugar um sistema de carburação do gás ao ar de admissão e a ignição é realizada por centelha ao invés das velas. Além disto, é necessário realizar alterações nos cabeçotes dos motores para que a taxa de compressão seja adequada, uma vez que motores de ciclo Otto possuem taxas de compressão inferiores aos motores de ciclo Diesel, 11:1 e 19:1, respectivamente. Todavia, neste processo ocorre muita perda energética (Pereira et al., 2005; Brenneisen, 2013 apud ARAÚJO et al., 2014).

Atualmente já não está sendo mais necessário fazer adaptações em motores de ciclo Otto e Diesel, pois já existem fabricantes de motores de combustão interna a biogás como GE, Caterpillar e Cummins.

Para aumentar a eficiência do motor de combustão interna tem-se utilizado o processo de cogeração. Neste sistema é produzido simultaneamente dois ou mais tipos de energias usando o mesmo combustível. Com a cogeração há aumento da eficiência do motor e queda nas emissões, quando comparado ao motor produzindo somente eletricidade.

2.4. Aspectos técnicos da produção de biohidrogênio por reforma a vapor do biogás

A reforma a vapor é uma tecnologia desenvolvida e utilizada industrialmente para geração de hidrogênio principalmente como insumo químico. A maior parte do hidrogênio produzido é utilizado no próprio local de produção principalmente pelas refinarias de petróleo, pelas indústrias químicas e petroquímicas, sendo que o principal combustível fóssil para esse fim é o gás natural (SORDI et al., 2006).

O biogás produzido em biodigestores ou em aterros sanitários pode ser um substituto do gás natural neste processo, por apresentarem composições semelhantes, embora proporções diferentes. Em específico o biogás de aterros sanitários seria uma ótima opção, pois quando queimado em *flare* emite gases de efeito estufa e quando utilizado na produção de biohidrogênio, dióxido de carbono é emitido em proporções menores.

O processo de reforma consiste em dois reatores (reator de reforma e o reator *shift*). No reator de reforma ocorrem as reações catalíticas do biogás com vapor de água. Os produtos destas reações são hidrogênio e monóxido de carbono. No reator *shift* todo CO produzido no reator de reforma, reagem com o vapor de água produzindo hidrogênio e dióxido de carbono. Logo, no final do processo de reforma, os produtos principais das reações são hidrogênio e dióxido de carbono (BRAGA et. al, 2013)

De acordo com Silva (2010), o principal elemento que forma o biogás é o metano. As principais reações são a reforma a vapor e a reação troca água-gás apresentadas nas Equações (9) e (10), respectivamente.



Segundo Lee et al. (2012) *apud* Braga (2014), a reação Global do processo de reforma é apresentada na equação (11):



Capítulo 3. ANÁLISE ENERGÉTICA

Para realizar a análise energética do processo de eletrólise foi considerada eletricidade gerada em um motor de combustão interna a biogás. E para o processo reforma a vapor o biogás foi considerado como combustível a ser utilizado no reformador e na caldeira. Este estudo baseia-se na produção de biogás de três aterros sanitários da cidade de São Paulo.

Atualmente a cidade de São Paulo utiliza três aterros para dispor os resíduos sólidos urbanos, dois privados e um aterro funcionando sob objeto de concessão, sendo eles respectivamente: Aterro Sanitário Caieiras, Aterro Sanitário Centro de Disposição de Resíduos (CDR) Pedreira e o Aterro Sanitário Central de Tratamento de Resíduos Leste (CTL) (ATERROS SANITÁRIOS E TRANSBORDOS, 2016)

A produção de biogás dos aterros em estudos é apresentada na Tabela 1.

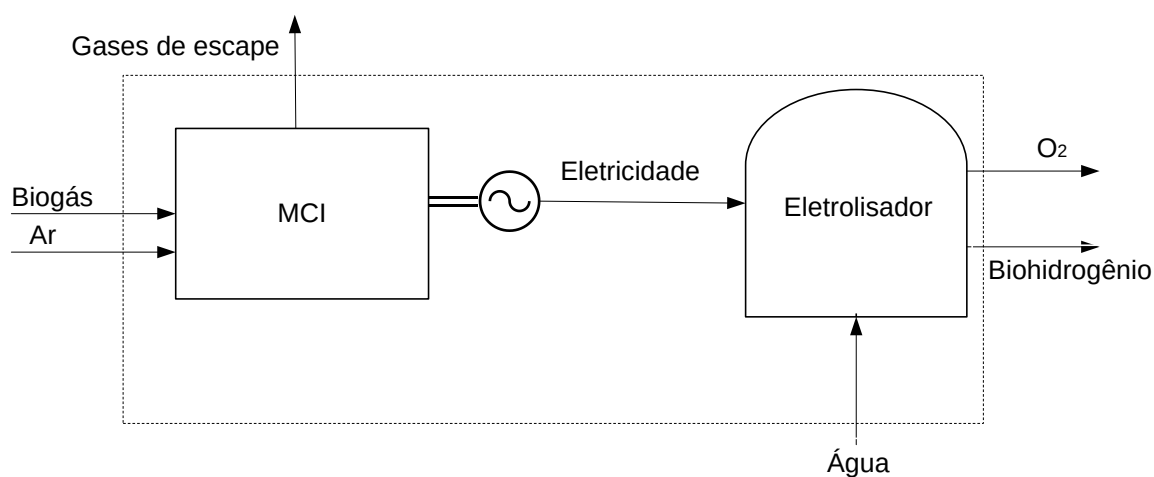
Tabela 1: Produção de biogás dos aterros sanitários da cidade de São Paulo

Aterro Sanitários	Produção média de biogás [Nm³/h]
Caieiras (TERMOVERDE, 2016)	19000
CDR (CDR, 2016)	15000
CLT (ECOURBIS, 2016)	16333
Total	50333

3.1 Análise Energética do Processo de Eletrólise

Para o processo de eletrólise foi considerado um motor de combustão interna a biogás gerando eletricidade para ser utilizada no eletrolisador a fim de produzir biohidrogênio, os insumos e produtos do processo são apresentados na Figura 9.

Figura 9: Fluxograma do processo de eletrólise



Fonte: Própria autora

A eficiência energética do processo de eletrólise utilizando eletricidade produzida na queima de biogás no motor de combustão interna foi calculada através da equação (12) dada por Braga (2014).

$$\eta_{eleto.elMCI} = \eta_{eletrolisador} * \eta_{el.MCI} \quad (12)$$

Onde:

$\eta_{eleto.elMCI}$: eficiência energética do processo de eletrólise [-]

$\eta_{eletrolisador}$: eficiência do eletrolisador [-]

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

3.1.1 Eletrolisador

Para seleção do eletrolisador foi considerada a potência elétrica requerida pelo mesmo, valor esse utilizado como parâmetro de escolha de conjunto motor de combustão interna/gerador a biogás comercialmente disponível. A empresa Caterpillar comercializa motores a biogás de 72 a 3370 kW. O Anexo 1 apresenta o catálogo da empresa Hydrogenics, com as características dos modelos disponíveis comercialmente de eletrolisadores com capacidades de produção de 4 a 1300 Nm³/h de biohidrogênio, e modelos com capacidades acima de 120 Nm³/h requer 4,9 kWh/Nm³. Com base nessas informações opta-se pelo modelo de eletrolisador HySTAT 600 cujas características são apresentadas na Tabela 2

Tabela 2: Características do eletrolisador selecionado para os estudos

Características	Valor
Capacidade [Nm ³ /h]	600
Potência elétrica requerida [kW]	2940
Água consumida [m ³ /h]	1,05

Fonte: Hydrogenics (2016)

De acordo com Braga (2014), a eficiência energética do eletrolisador pode ser determinada pela equação (13):

$$\eta_{eletrolisador} = \frac{\dot{m}_{H_2} * PCI_{H_2}}{E_{req.}} \quad (13)$$

Onde:

$E_{req.}$: eletricidade requerida no eletrolisador [kW]

$\dot{m}_{H_2}$: fluxo mássico de biohidrogênio produzido [kg/s]

PCI_{H_2} : Poder Calorífico Inferior do biohidrogênio [kJ/kg]

$\eta_{eletrolisador}$: eficiência do eletrolisador [-]

O Poder Calorífico Inferior do biohidrogênio (PCI_{H_2}) é 119950 kJ/kg (SANTOS, 2003).

3.1.2 Motor de Combustão Interna a Biogás

O conjunto motor de combustão interna/gerador (MCI) a biogás selecionado para produzir eletricidade destinada ao processo de eletrólise é o modelo CG 260-16 (60 Hz) da Caterpillar, cujo as características são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Características do motor de combustão interna a biogás modelo CG 260-16 (60 Hz)

Características	Valor
Potência Elétrica [kW]	3370
Pressão média efetiva [bar]	17
Eficiência elétrica [%]	43,1
Eficiência térmica [%]	38,6
Eficiência total [%]	81,7

Fonte: Caterpillar (2016)

A eficiência de geração de eletricidade de catálogo do fabricante tem um valor elevado quando comparado com a literatura. Brizi et. al (2014), indica um valor de eficiência de geração de eletricidade de 25% e Yingjian et. al (2014) o valor de 28,45%, ambos considerando MCI a biogás.

Para fins comparativos são considerados as eficiências de geração de eletricidade do catálogo do fabricante de 43,1% (MCI 43,1%) e um valor médio de 26,5% da literaturas indicadas anteriormente.

Através da equação (14) pode-se determinar a quantidade de biogás necessária para produzir a potência indicada do motor de combustão interna.

$$\dot{m}_{biogásMCI} = \frac{\dot{E}_{pMCI}}{\eta_{elMCI} * PCI_{biogás}} \quad (14)$$

Onde:

$\dot{m}_{biogásMCI}$: fluxo mássico de biogás no motor de combustão interna [kg/s]

$PCI_{biogás}$: Poder Calorífico Inferior do biogás [kJ/kg]

$\dot{E}_{pMCI}$: potência elétrica produzida no motor-gerador [kW]

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

- Cálculo do Poder Calorífico Inferior do Biogás:

Segundo Miroslav (2001) apud Zamorano (2007), a composição de biogás de aterros sanitários é 55% de CH_4 e 45% de CO_2 . Araújo (2014), afirma que a maior parte do biogás de aterros sanitários brasileiros possui composição com valores acima de 30% de CO_2 e 50-55% de CH_4 . Logo, para este trabalho foi considerada a composição do biogás de 55% de CH_4 e 45% de CO_2 .

De acordo com Vicentini (2011), o Poder Calorífico Inferior do biogás ($PCI_{biogás}$) pode ser determinado através da equação (15).

$$PCI_{biogás} = \frac{-(H_P - H_R)}{MM_{biogás}} \quad (15)$$

Onde:

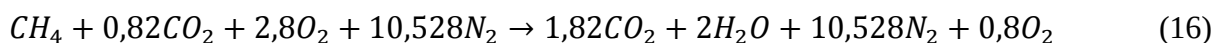
H_P : entalpia do produto da combustão [kJ/kmol]

H_R : entalpia do reagente na combustão [kJ/kmol]

$PCI_{biogás}$: Poder Calorífico Inferior do biogás [kJ/kg]

$MM_{biogás}$: massa molar do biogás [kmol/kg]

A reação real de combustão do biogás é apresentada na equação (16). O excesso de ar usado para combustão é de 40% (XAVIER, 2016).



A Tabela 4 apresenta as entalpias de formação e a massa molar dos elementos da combustão do biogás para temperatura de 298 K.

Tabela 4: Diferença entálpica, entalpia de formação e massa molar

Elementos	h [kJ/kmol]	Δh [kJ/kmol]	MM [kmol/kg]
CH_4	-74873	0	16
CO_2	-393522	0	44
N_2	0	0	28
H_2O	-241826	0	18
O_2	0	0	32

Fonte: Borgnakke e Sonntag (2013)

A entalpia dos produtos e reagentes, cujos coeficientes são mostrados na equação (16), é calculada através das equações (17) e (18), respectivamente.

$$H_P = 1,82(\Delta\bar{h} + \bar{h}_f^0)_{CO_2} + 2(\Delta\bar{h} + \bar{h}_f^0)_{H_2O} + 10,528(\Delta\bar{h} + \bar{h}_f^0)_{N_2} + 0,8(\Delta\bar{h} + \bar{h}_f^0)_{O_2} \quad (17)$$

$$H_R = 1,00(\Delta\bar{h} + \bar{h}_f^0)_{CH_4} + 0,82(\Delta\bar{h} + \bar{h}_f^0)_{CO_2} + 2,8(\Delta\bar{h} + \bar{h}_f^0)_{O_2} + 10,528(\Delta\bar{h} + \bar{h}_f^0)_{N_2} \quad (18)$$

A massa molar do biogás pode ser calculada pela equação (19).

$$MM_c = 1,00MM_{CH_4} + 0,82MM_{CO_2} \quad (19)$$

O cálculo do Poder Calorífico Inferior do biogás com 55% de CH_4 e 45% de CO_2 resultou em 15429 kJ/kg e a massa molar 52,08 kmol/kg.

3.2 Potencial de Cogeração

O motor utilizado para geração de eletricidade, destinada ao processo de eletrólise, tem grande potencial de cogeração. Os gases de escape devido a combustão do biogás podem ser utilizados para produzir água quente ou água gelada.

A fim de obter o potencial de produção de energia útil a partir do biogás dos aterros sanitários estudados, foram considerados duas possibilidades de sistemas de cogeração:

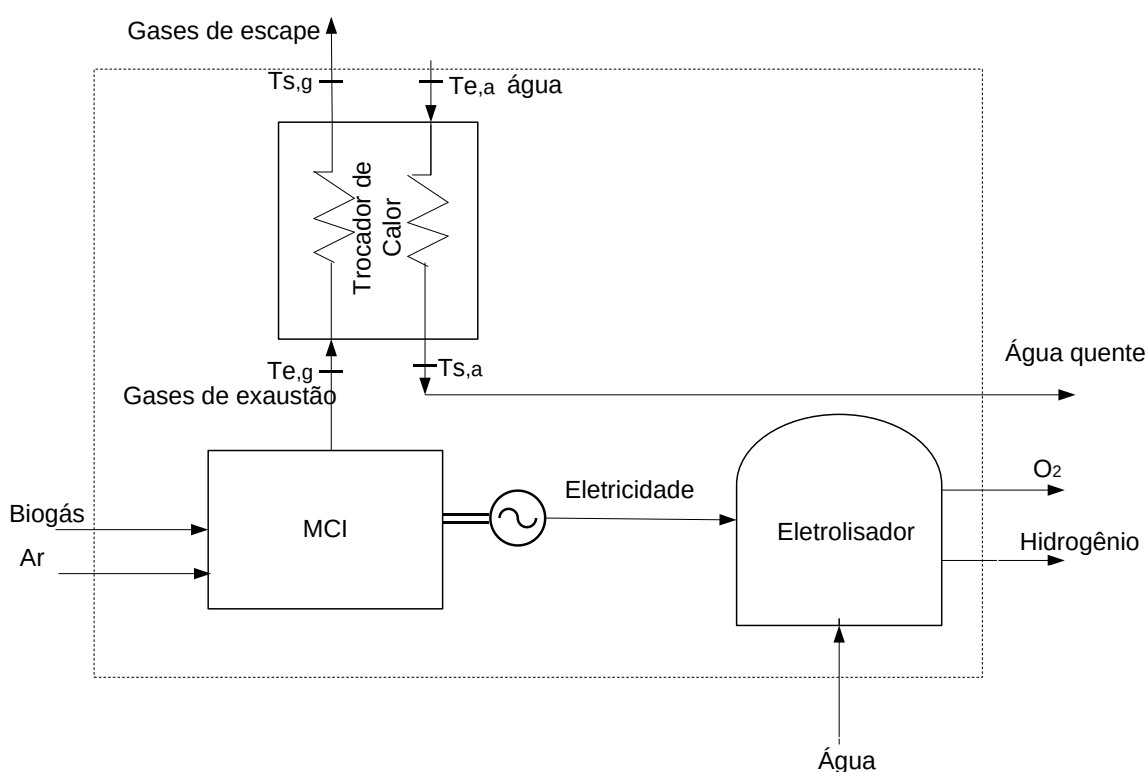
- Potencial de Cogeração: produção de biohidrogênio e água quente.
- Potencial de Cogeração: Produção de biohidrogênio e água gelada.

3.2.1 Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Quente

O MCI produz a eletricidade necessária para o processo de eletrólise, que produz biohidrogênio. Parte do calor dos gases de exaustão são utilizados num trocador de calor para que seja produzida água quente.

A Figura 10 mostra o processo de eletrólise e de cogeração com motor de combustão interna, produzindo biohidrogênio e água quente, respectivamente.

Figura 10: Fluxograma do processo de eletrólise: produção de biohidrogênio e água quente



Fonte: Própria autora

De acordo com Xavier (2016), a temperatura de saída dos gases de exaustão do MCI a biogás, modelo CG 260-16 (60 Hz), é de 450 °C. Esses gases são utilizados no trocador de calor para a produção de água quente, de onde escapam para a atmosfera a 190 °C (ONOVWIONA et al., 2007).

Considera-se produção de água quente com temperaturas variando de 50 a 80°C, para uma temperatura de entrada de água a 25°C. A eficiência do trocador de calor foi considerada de 62%, de acordo com indicação de MACHADO e WANDER (2015).

De acordo Onovwiona et al. (2007), através das Equações (20) e (21) é possível calcular o fluxo de calor residual disponível nos gases de escape e o fluxo de água quente que pode ser produzido em função da temperatura, respectivamente.

$$Q_g = \dot{m}_g * c_{p_{m,g}} * (T_{e,g} - T_{s,g}) \quad (20)$$

$$Q_a = \dot{m}_a * c_{p_a} * (T_{s,a} - T_{e,a}) \quad (21)$$

Onde:

c_{p_a} : calor específico a pressão constante da água [kJ/kg.K]

$c_{p_{m,g}}$: calor específico a pressão constante médio dos gases[kJ/kg.K]

$\dot{m}_a$: fluxo de água no trocador de calor [kg/s]

$\dot{m}_g$: fluxo mássico de gases de exaustão do motor [kg/s]

Q_a : fluxo de calor residual absorvida pela água no trocador de calor [kW]

Q_g : fluxo de calor residual disponível nos gases de escape no trocador de calor [kW]

$T_{e,a}$: temperatura da água na entrada do trocador de calor [K]

$T_{e,g}$: temperatura dos gases na entrada do trocador de calor [K]

$T_{s,a}$: temperatura da água na saída do trocador de calor [K]

$T_{s,g}$: temperatura dos gases na saída do trocador de calor [K]

O fluxo mássico de gases de exaustão é a soma da quantidade de combustível e ar utilizados na combustão. Para obter o fluxo de ar foi utilizada a relação ar/combustível considerando a equação (22). Os coeficientes utilizados na equação (22) é o resultado da combustão do biogás apresentando na equação (16) da seção 3.1.2.

$$\lambda = \frac{2,8*MM_{O_2} + 10,528*MM_{N_2}}{1,0*MM_{CH_4} + 0,82*MM_{CO_2}} \quad (22)$$

Onde:

MM_{CH_4} : massa molar do metano [kmol/kg]

MM_{CO_2} : massa molar do dióxido de carbono [kmol/kg]

MM_{N_2} : massa molar do nitrogênio [kmol/kg]

MM_{O_2} : massa molar do oxigênio [kmol/kg]

λ : relação ar/combustível [-]

Para calcular o calor específico médio dos gases de exaustão (levando em consideração a temperatura de entrada e saída no trocador de calor de 450°C e 190°C, respectivamente), pode-se utilizar a equação (23).

$$c_{p_{m,g}} = \frac{(c_{p_{g,450^{\circ}C}} + c_{p_{g,190^{\circ}C}})}{2} \quad (23)$$

Onde:

$c_{p_{m,g}}$: calor específico a pressão constante médio dos gases de exaustão [kJ/kg.K]

$c_{p_{g,190^{\circ}C}}$: calor específico a pressão constante dos gases de escape a 190°C [kJ/kg.K]

$c_{p_{g,450^{\circ}C}}$: calor específico a pressão constante dos gases de exaustão a 450°C [kJ/kg.K]

A equação (24) mostra como é calculado o calor específico dos gases para determinadas temperaturas. Os coeficientes utilizados são os obtidos da combustão do biogás apresentado na equação (16) da seção 3.1.2.

$$c_{p_g} = \frac{1,82 * c_{p_{CO_2}} + 2 * c_{p_{H_2O}} + 10,528 * c_{p_{N_2}} + 0,8 * c_{p_{O_2}}}{1,82 + 2 + 10,528 + 0,8} \quad (24)$$

Onde:

$c_{p_{CO_2}}$: calor específico a pressão constante do dióxido de carbono [kJ/kg.K]

c_{p_g} : calor específico a pressão constante dos gases de exaustão [kJ/kg.K]

$c_{p_{H_2O}}$: calor específico a pressão constante da água [kJ/kg.K]

$c_{p_{N_2}}$: calor específico a pressão constante do nitrogênio [kJ/kg.K]

$c_{p_{O_2}}$: calor específico a pressão constante do oxigênio [kJ/kg.K]

Borgnakke e Sonntag (2013) recomendam as equações (25), (26), (27) e (28) para o cálculo do calor específico a pressão constante do dióxido de carbono (CO_2), do vapor de água (H_2O), nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2), respectivamente, considerando os componentes dos gases de exaustão. A equação (29) possibilita a parametrização da temperatura e é válida para $T(K)$ entre 50 a 1000 K.

$$c_{p_{CO_2}} = 0,45 + (1,67 * \theta) - (1,27 * \theta^2) + (0,39 * \theta^3) \quad (25)$$

$$c_{p_{H_2O}} = 1,79 + (0,107 * \theta) + (0,586 * \theta^2) - (0,2 * \theta^3) \quad (26)$$

$$c_{p_{N_2}} = 1,11 + (0,48 * \theta) + (0,96 * \theta^2) - (0,42 * \theta^3) \quad (27)$$

$$c_{p_{O_2}} = 0,88 - (0,0001 * \theta) + (0,54 * \theta^2) - (0,33 * \theta^3) \quad (28)$$

$$\theta = \frac{T(K)}{1000} \quad (29)$$

A eficiência global dos produtos da cogeração do aterro sanitário pode ser determinada pela equação (30).

$$\eta_{g_{aterro_{H_2+H_2Oq}}} = \frac{\dot{E}_{H_2} + Q_a}{\dot{E}_{biogásMCI}} \quad (30)$$

Onde:

$$\dot{E}_{H_2} = \dot{m}_{H_2} * PCI_{H_2} \quad (31)$$

$$\dot{E}_{biogásMCI} = \dot{m}_{biogásMCI} * PCI_{biogás} \quad (32)$$

Onde:

$\dot{E}_{biogásMCI}$: potência fornecida pela queima do biogás no motor de combustão interna [kW]

$\dot{E}_{H_2}$: potência suprida pelo biohidrogênio [kW]

$\dot{m}_{biogásMCI}$: consumo de biogás pelo motor de combustão interna [kg/s]

$\dot{m}_{H_2}$: fluxo mássico de biohidrogênio produzido [kg/s]

$PCI_{biogás}$: Poder Calorífico Inferior do biogás [kJ/kg]

PCI_{H_2} : Poder Calorífico Inferior do biohidrogênio [kJ/kg]

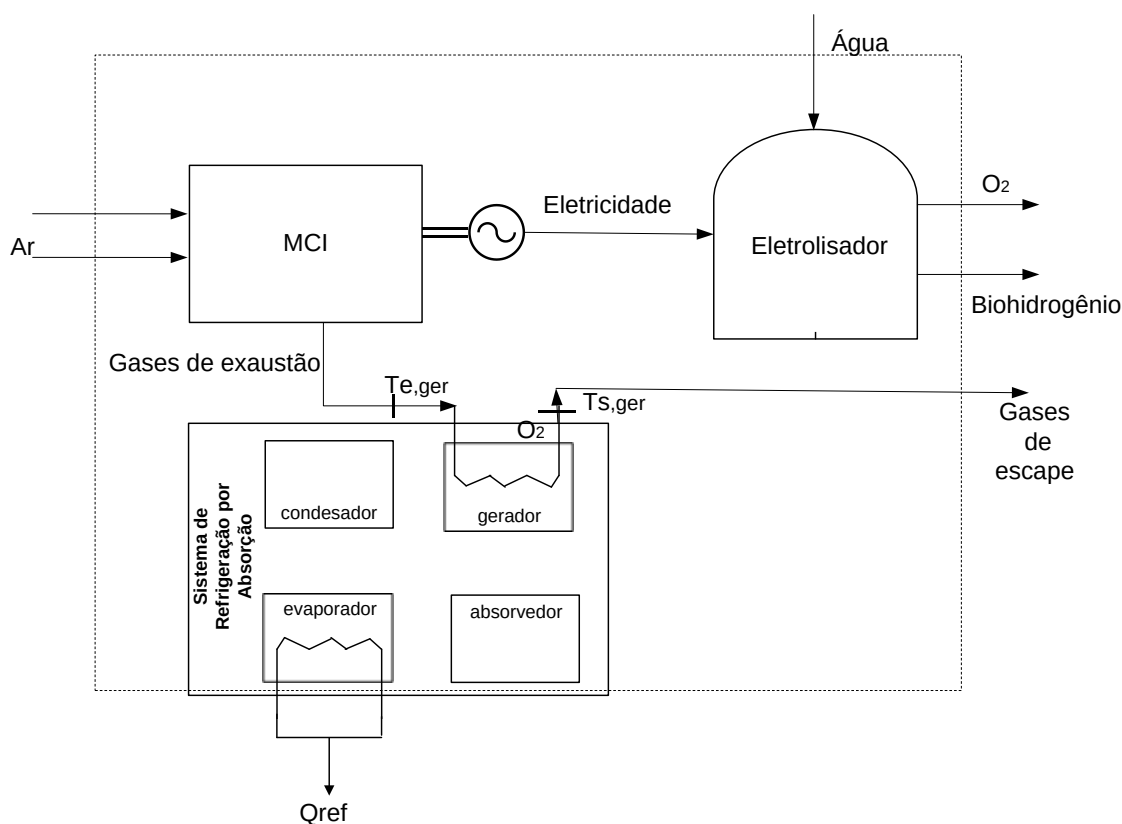
Q_a : fluxo de calor entregue á água no trocador de calor [kW]

$\eta_{g_{aterro_{H_2+H_2Oq}}}$: eficiência global de produção de energia (H_2 + água quente) [-]

3.2.2 Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Gelada

Parte do calor residual dos gases quentes do MCI podem produzir água gelada em sistema de refrigeração por absorção (SRA). A Figura 11 mostra o processo de eletrólise e de cogeração com motor de combustão interna, produzindo biohidrogênio e água gelada, respectivamente.

Figura 11: Fluxograma do potencial de cogeração: produção de biohidrogênio e água gelada



Fonte: Própria autora

Para dados comerciais de sistemas de refrigeração por absorção foi utilizado o catálogo da empresa Thermanx (2016). Os modelos apresentam um coeficiente de performance médio (COP) de 1,39 (SRA de duplo estágio - BrLi - H₂O) e com temperatura dos gases de exaustão na saída do gerador do SRA variando de 170 - 200 °C.

Neste trabalho foi considerado o mesmo valor de COP, temperatura dos gases de exaustão na entrada do gerador do SRA de 450°C e temperatura dos gases de exaustão na saída do gerador de 185 °C.

Segundo Brizi et al. (2014), através das Equações (33) e (34) pode-se calcular a capacidade de produção de água gelada no sistema de refrigeração por absorção e o fluxo de calor residual disponível nos gases de escape entregue ao gerador do SRA, respectivamente.

$$Q_{ref} = Q_{ger} * COP \quad (33)$$

$$Q_{ger} = \dot{m}_g * c_{p_{m,g}} * (T_{e,ger} - T_{s,ger}) \quad (34)$$

Onde:

COP : coeficiente de desempenho do SRA [-]

$c_{p_{m,g}}$: calor específico médio a pressão constante dos gases [kJ/kg.K]

$\dot{m}_g$: fluxo mássico de gases de exaustão do motor [kg/s]

Q_{ger} : fluxo de calor residual disponível nos gases de escape entregue ao SRA [kW]

Q_{ref} : capacidade térmica do SRA de produção de água gelada [kW]

$T_{e,ger}$: temperatura dos gases de exaustão na entrada do SRA [K]

$T_{s,ger}$: temperatura dos gases de exaustão na saída do SRA [K]

A equação (35) permite determinar a eficiência global de produção de energia do aterro considerando a produção de água gelada no sistema de refrigeração por absorção e a produção de biohidrogênio no processo de eletrólise.

$$\eta_{g_{aterro_{H_2+H_2Og}}} = \frac{\dot{E}_{H_2} + Q_{ref}}{\dot{E}_{biogasMCI}} \quad (35)$$

Onde:

$\dot{E}_{biogasMCI}$: potência fornecida pela queima do biogás no motor de combustão interna [kW]

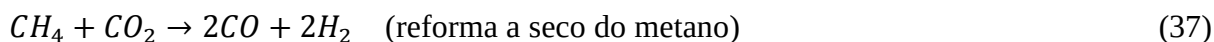
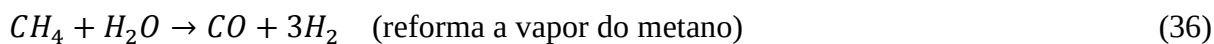
$\dot{E}_{H_2}$: potência suprida pelo biohidrogênio [kW]

Q_{ref} : potência frigorífica do SRA [kW]

$\eta_{g_{aterro_{H_2+H_2Og}}}$: eficiência global de produção de energia (H_2 + água gelada) [-]

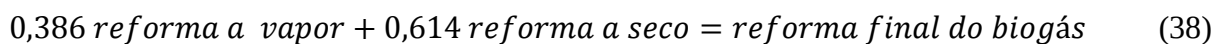
3.2 Análise Energética do Processo de Reforma a Vapor

Segundo Braga et al. (2013) as reações indicadas nas Equações (36) e (37) ocorrem no reformador principal..



De acordo com Braga (2014), em 1 mol de biogás (0,55 mols de CH_4 e 0,45 mols CO_2) todo CO_2 reage na reforma a seco.

Reação final da reforma a vapor do biogás é mostrada na equação (38):

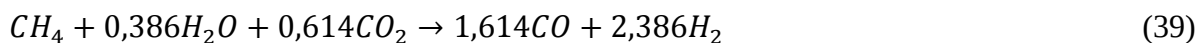


Para calcular a eficiência do processo de reforma a vapor do biogás considera-se a estequiometria de reação.

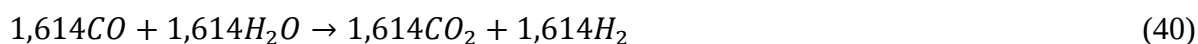
Devido à necessidade de utilizar excesso de vapor, de não considerar que as reações ocorram com 100 % de eficiência e evitar reações indesejadas, faz-se necessário o uso de catalisadores do processo de reforma. Estudos prévios indicam o uso de catalisador 5%Ru/ γ - Al_2O_3 com 80% de eficiência de reação (reformador principal), e para o reator *shift* o catalisador Cu/ZnO- γ - Al_2O_3 , com 93% de eficiência de reação (Braga, 2014).

A seguir são apresentadas as reações no reformador, no reator *shift* e a global::

- Reformador Principal:



- Reator *shift* :

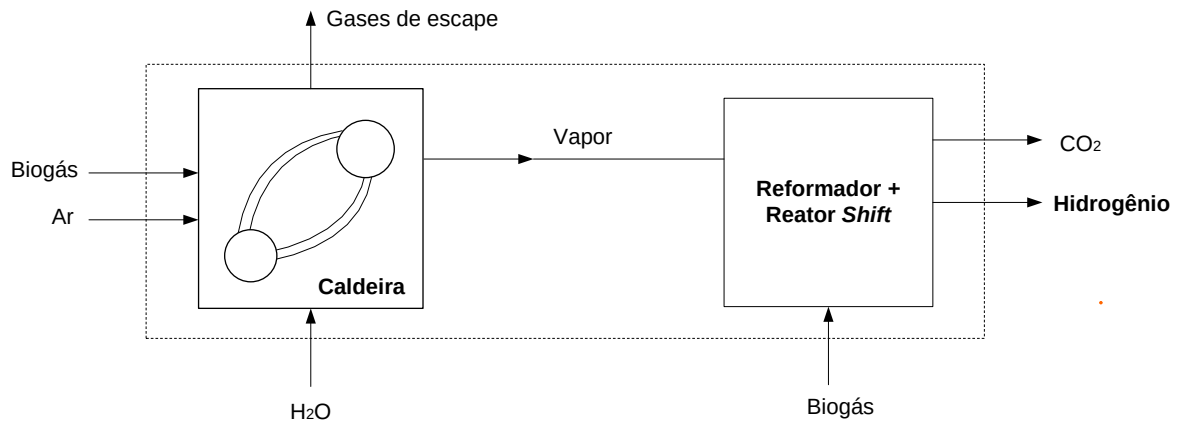


-Reação global com eficiência de 74,4%:



A Figura 12 apresenta o fluxograma do processo de reforma a vapor do biogás utilizado para análise energética.

Figura 12: Fluxograma do processo de reforma a vapor



Fonte: Própria autora

A eficiência energética do processo de reforma a vapor do biogás pode ser calculada pela equação (42), dada por BRAGA (2014).

$$\eta_{reforma} = \frac{\dot{m}_{H_2} * PCI_{H_2}}{\dot{m}_{biogás.Cald.} * PCI_{biogás} + \dot{m}_{biogás.ref.} * PCI_{biogás}} \quad (42)$$

Onde:

$\dot{m}_{biogás.Cald.}$: fluxo mássico de biogás na caldeira [kg/s]

$\dot{m}_{biogás.ref.}$: fluxo mássico de biogás no reformador [kg/s]

$\dot{m}_{H_2}$: fluxo mássico de biohidrogênio produzido [kg/s]

$PCI_{biogás}$: Poder Calorífico Inferior do biogás [kJ/kg]

PCI_{H_2} : Poder Calorífico Inferior do biohidrogênio [kJ/kg]

$\eta_{reforma}$: eficiência energética do processo de reforma a vapor do biogás [-]

Segundo Krich et al., (2005), a eficiência da caldeira queimando biogás varia de 75 a 85 %. Neste trabalho foi considerado o valor de 85%. De acordo com Braga (2014), a temperatura do vapor para o processo de reforma é de 700 °C. Avraam et al. (2010) indicam uma relação molar vapor/biogás de 3,04.

A equação (43) pode ser utilizada para calcular o fluxo de biogás necessário (para queimar) na caldeira e produzir o vapor utilizado necessário no processo de reforma.

$$\dot{m}_{biogás.Cald.} = \frac{\dot{m}_{vapor} * \Delta h_{vapor}}{\eta_{Cald.} * PCI_{biogás}} \quad (43)$$

Onde:

$\dot{m}_{biogás.Cald.}$: consumo de biogás na caldeira [kg/s]

$\dot{m}_{vapor}$: fluxo mássico de vapor produzido na caldeira [kg/s]

$PCI_{biogás}$: Poder Calorífico Inferior do biogás [kJ/kg]

$\eta_{Cald.}$: eficiência da caldeira [-]

Δh_{vapor} : variação de entalpia específica da água na caldeira [kJ/kg]

3.3 Resultados da Análise Energética

É possível determinar a eficiência energética de cada processo (eletrólise e reforma a vapor) e a capacidade de produção de biohidrogênio e o potencial de cogeração em cada aterro da cidade de São Paulo.

3.3.1 Resultados da Análise Energética do Processo de Eletrólise

Da análise energética aplicada ao processo de eletrólise obteve-se resultados do fluxo mássico de biogás necessário ao motor de combustão interna, a eficiência do eletrolisador e a eficiência energética do processo de eletrólise para uma produção de biohidrogênio de $600\text{Nm}^3/\text{h}$. A Tabela 5 apresenta resultados para o MCI com eficiência de geração de eletricidade de catálogo (43,1%) e eficiência de literatura (26,5%).

Tabela 5: Resultados da análise energética do processo de eletrólise (somente Biohidrogênio)

Resultados	Valores (MCI 43,1%)	Valores (MCI 26,5%)
Fluxo mássico de biogás no motor de combustão interna($\dot{m}_{biogásMCI}$) [Nm^3/h]	2548	4144,18
Eficiência do eletrolisador($\eta_{eletrolisador}$) [%]	61,13	61,13
Eficiência energética do processo de eletrólise ($\eta_{eletro.el.MCI}$) [%]	26,35	16,19

A Tabela 6 mostra a produção de biogás, a capacidade de produção de biohidrogênio no processo de eletrólise, a quantidade de eletrolisadores e de MCI necessários para cada aterro.

Tabela 6: Capacidade de produção de biohidrogênio dos aterros da cidade de São Paulo

	Caieiras	CDR	CLT	Total
Produção de biogás [m³/h]	19000	15000	16333	50333
Capacidade de produção de Biohidrogênio (MCI 43,1%) [Nm³/h]	4474,01	3532,12	3846,00	11852,15
Capacidade de produção de Biohidrogênio (MCI 26,5%) [Nm³/h]	2750,84	2171,72	2364,71	7287,28
Quantidade de Eletrolisador (MCI 43,1%) [-]	8	6	7	21
Quantidade de Eletrolisador (MCI 26,5%) [-]	5	4	4	13
Quantidade de MCI 43,1% [-]	8	6	7	21
Potência elétrica total produzida [kW]	26960	20220	23590	70770
Potência elétrica total requerida [kW]	24938	19546	21568	66052
Potência elétrica total excedente [kW]	2022	674	2022	4718
Quantidade de MCI 26,5% [-]	5	4	4	13
Potência elétrica total produzida [kW]	16850	13480	13480	43810
Potência elétrica total requerida [kW]	15434,6	12165,7	13277,8	40878,1
Potência elétrica total excedente [kW]	1415,4	1314,3	202,2	2931,9

Fonte: Própria autora

3.3.2 Resultados do Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Quente

A Tabela 7 mostra os resultados da análise energética considerando a produção de biohidrogênio pelo processo de eletrólise e água quente através da cogeração com MCI.

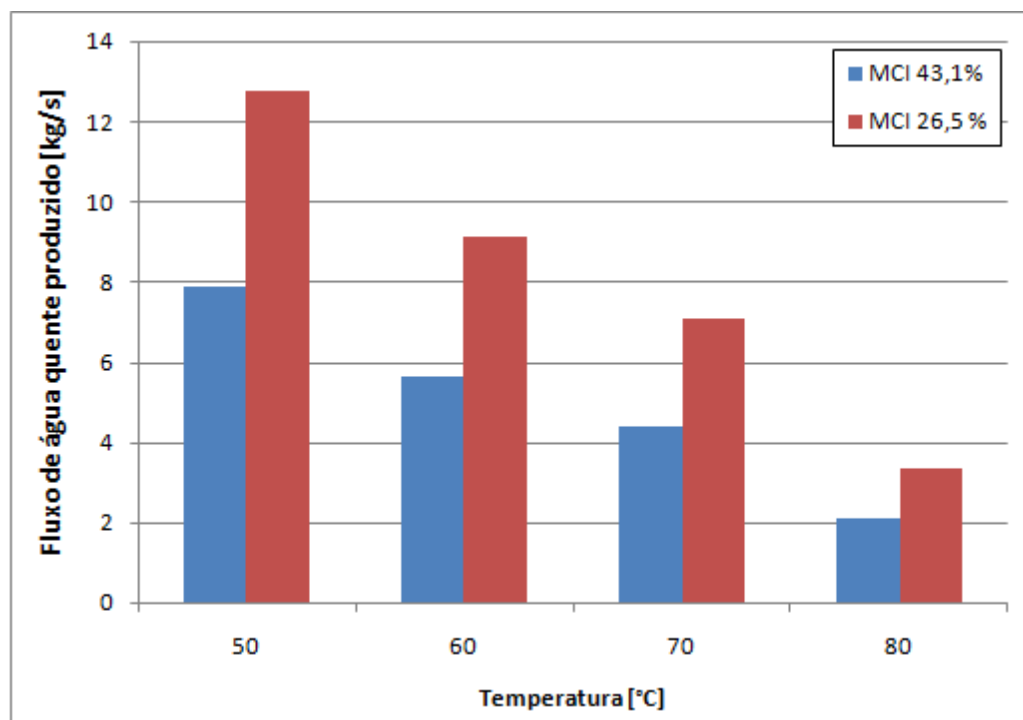
Tabela 7: Resultados do potencial de cogeração: produção de biohidrogênio e água quente

Resultados	Valores (MCI 43,1%)	Valores (MCI 26,5%)
Relação ar/combustível (λ) [-]	7,39	7,39
Fluxo de gases de exaustão ($\dot{m}_g$) [kg/s]	4,25	6,92
Calor específico pressão constante médio dos gases ($c_{p_{m,g}}$) [kJ/kg.K]	1,19	1,19
Fluxo de calor entregue á água no trocador de calor (Q_a) [kW]	821,06	1335,39
Eficiência global de produção de energia (H ₂ + água quente ($\eta_{g_{aterro_{H_2+H_2Oq}}}$) [%]	33,48	24,63

Fonte: Própria autora

A Figura 13 mostra a produção de água quente para temperaturas de 50 a 80°C, considerando eficiências de geração de eletricidade de 26,5% e 43,1% para o MCI.

Figura 13: Produção de água quente de acordo com a temperatura



Fonte: Própria autora

Através da Figura 13 é possível observar que quanto maior a temperatura menor é o fluxo de água quente que pode ser produzido.

3.3.2 Resultado do Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Gelada

Da análise energética do processo de eletrólise considerando produção de biohidrogênio combinado com produção simultânea de água gelada são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Potencial de cogeração: produção de biohidrogênio e água gelada

Resultado	Valores (MCI 43,1%)	Valores (MCI 26,5%)
Fluxo de calor residual disponível nos gases de escape entregue ao SRA (Q_{ger}) [kW]	1349,76	2195,28
Potência frigorífica do SRA (Q_{ref}) [kW]	1876,17	3051,43
Eficiência global de produção de energia (H ₂ + água gelada) ($\eta_{g_{aterro}}$) [-]	46,98	38,12

Fonte: Própria autora

A Tabela 9 apresenta as características do SRA selecionado.

Tabela 9: Características do sistema de refrigeração por absorção

Resultado	Valores (MCI 43,1%)	Valores (MCI 26,5%)
Capacidade de refrigeração [kW]	1959	3060
Fluxo mássico de água gelada [kg/s]	93,33	145,77
Temperatura de entrada da água (refrigeração) [°C]	12,0	12,0
Temperatura de saída da água (refrigeração) [°C]	7,0	7,0
Fluxo mássico de água para refrigeração [kg/s]	154,72	263,88
Temperatura de entrada da água refrigeração [°C]	29,4	29,4
Temperatura de saída da água refrigeração [°C]	34,6	34,6
Faixa de temperatura de entrada dos gases de exaustão [°C]	275 - 600	275 - 600
Faixa de temperatura de saída dos gases de exaustão [°C]	170 - 200	170 - 200
Máxima potência térmica fornecida pelos gases de exaustão [kW]	1409	2404

Fonte: Catálogo Thermax (2016)

3.4.2 Resultado da Análise Energética do Processo de Reforma a Vapor do Biogás

Da análise energética do processo de reforma a vapor do biogás, considerando um produção de 600 Nm³/h de biohidrogênio, similar a capacidade de um eletrolisador selecionado, têm-se os resultados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Resultados da análise energética do processo de reforma a vapor do biogás

Resultados	Valores
Fluxo mássico de biogás na caldeira ($\dot{m}_{biogás.Cald.}$) [Nm ³ /h]	403,51
Fluxo mássico de biogás no reformador ($\dot{m}_{biogás.ref.}$) [Nm ³ /h]	520,32
Fluxo mássico de vapor produzido na caldeira ($\dot{m}_{vapor}$) [m ³ /h]	0,991
Eficiência energética do processo de reforma a vapor do biogás ($\eta_{reforma}$) [-]	63,39

Fonte: Própria autora

A Tabela 11 apresenta a capacidade de produção de biohidrogênio de cada aterro e o total da cidade de São Paulo.

Tabela 11: Capacidade de produção de biohidrogênio dos aterros da cidade de São Paulo

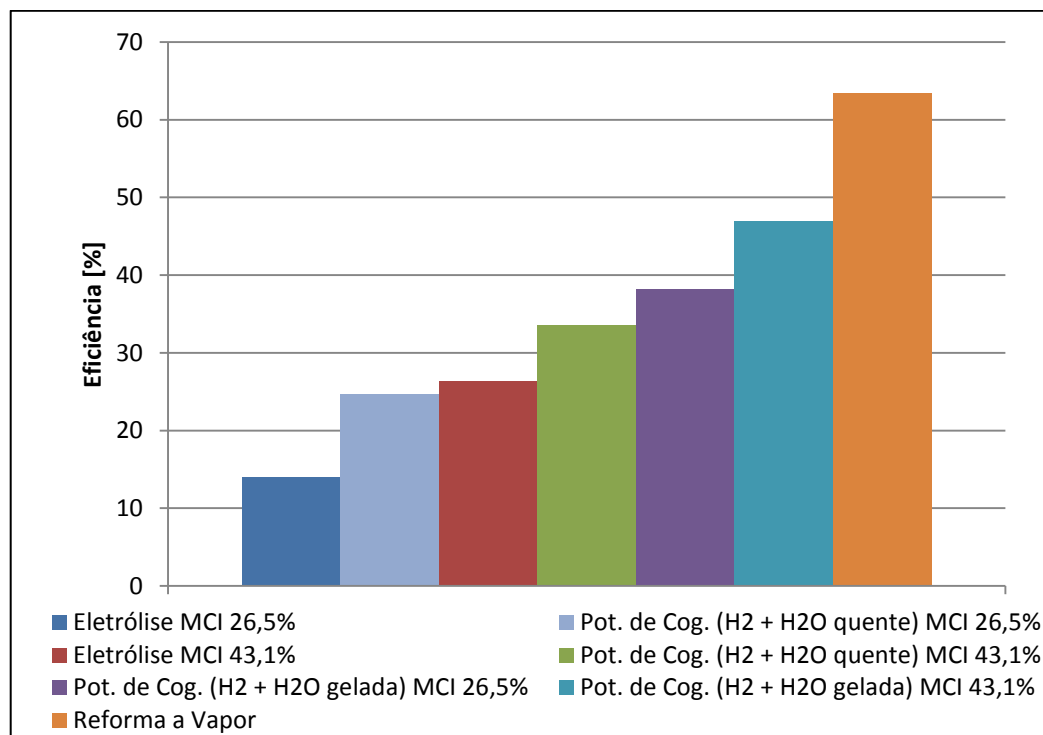
Aterro Sanitários	Produção de biogás [m ³ /h]	Capacidade de produção de biohidrogênio [Nm ³ /h]	Quantidade de reformadores [-]
Caieiras	19000	12339,45	21
CDR	15000	9741,67	17
CLT	16333	10607,38	18
Total	45333	32688,51	56

Fonte: Própria autora

3.4.3 Comparação dos Processos e Discussão dos Resultados

A Figura 14 mostra a comparação das eficiências energéticas do processo de eletrólise e do processo de reforma a vapor, incluindo também valores obtidos para a eficiência global de produção de energia e do potencial de cogeração em caso de eletrólise.

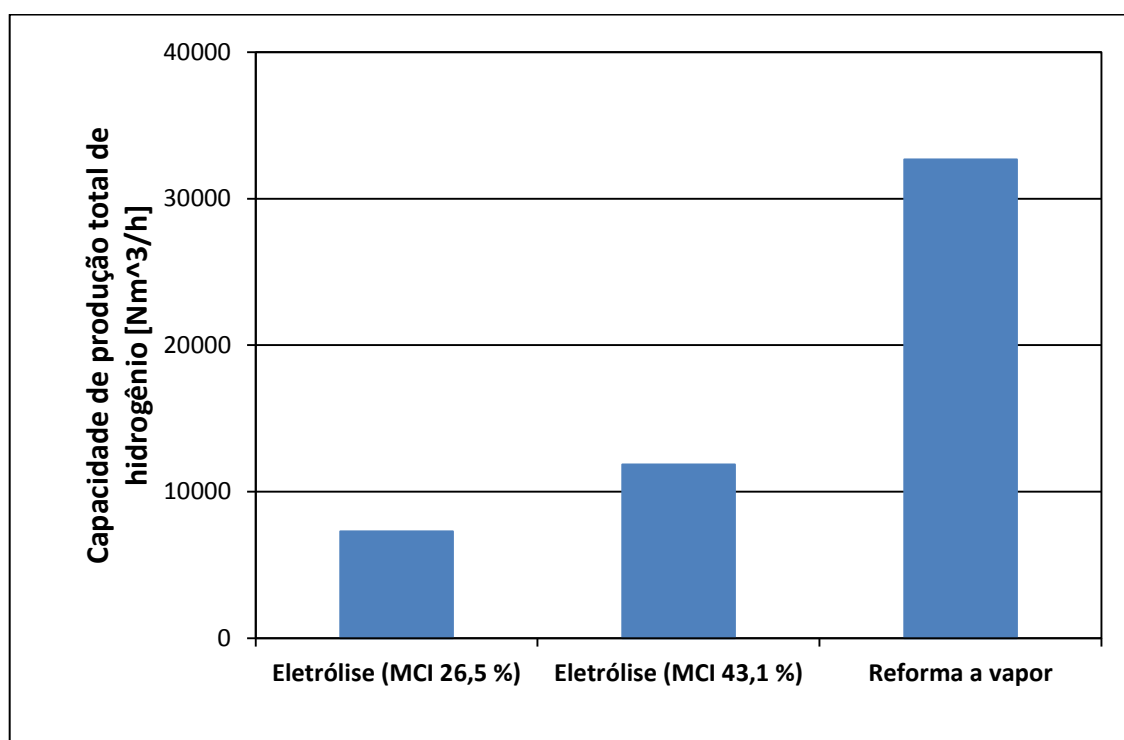
Figura 14: Eficiências energéticas dos processos



Fonte: Própria autora

A Figura 15 apresenta a comparação da capacidade de produção de biohidrogênio na cidade de São Paulo considerando o processo de eletrólise e de reforma a vapor do biogás.

Figura 15: Capacidade total de produção de biohidrogênio em função do processo utilizado



Fonte: Própria autora

Através da Figura 15 é possível observar que a capacidade de produção de biohidrogênio é maior quando se utiliza o processo de reforma a vapor, pois este processo apresenta maior eficiência energética.

Capítulo 4. ANÁLISE ECONÔMICA

Para a realização da análise econômica a fim de comparar o custo de produção de biohidrogênio dos dois processos estudados foi considerada produção de 600 Nm³/h.

O fator de anuidade que leva em consideração a taxa anual de juros (r) e o período de amortização (k) pode ser calculado através da equação (44) (SILVEIRA, 2017).

$$f = \frac{q^k(q-1)}{q^k-1} \quad (44)$$

Onde:

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (45)$$

Onde:

f : fator de anuidade [1/ano]

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

r : taxa de anual de juros [%]

4.1 Análise Econômica do Processo de Eletrólise (somente produção de Biohidrogênio)

Para determinar o custo de produção do biohidrogênio a partir da eletrólise da água, foi utilizada a metodologia desenvolvida por Silveira (2017), conforme a equação (46).

$$C_{H_2\text{eletrólise}} = \frac{Inv_{\text{eletrolisador}} * f}{H * \dot{E}_{H_2}} + Cop_{\text{eletrolisador}} + Cman_{\text{eletrolisador}} \quad (46)$$

Onde:

$C_{H_2\text{eletrólise}}$: custo de produção de biohidrogênio a partir da eletrólise [US\$/kWh]

$Cman_{\text{eletrolisador}}$: custo de manutenção do eletrolisador [US\$/kWh]

$Cop_{\text{eletrolisador}}$: custo de operação do eletrolisador [US\$/kWh]

$\dot{E}_{H_2}$: potência suprida pelo biohidrogênio [kW]

f : fator de anuidade [1/ano]

H : período equivalente de utilização [h/ano]

$Inv_{\text{eletrolisador}}$: investimento no eletrolisador [US\$]

Segundo Genevieve (2008) pode se estimar o custo de eletrolisadores para a faixa de produção de biohidrogênio de 0,1 kg/h a 100 kg/h de acordo com a equação (47).

$$C_{\text{eletrolisador}} = 224,49(\dot{m}_{H_2})^{0,6156} * 10^3 \quad (47)$$

Onde:

$C_{\text{eletrolisador}}$: custo de investimento do eletrolisador [US\$]

$\dot{m}_{H_2}$: fluxo mássico de biohidrogênio produzido [kg/h]

Para se obter uma maior precisão do custo de investimento do eletrolisador para 600 Nm³/h de biohidrogênio é utilizada a técnica de Boehm (1987). Para a aplicação desta técnica foi necessária a caracterização do equipamento, identificação de C_r , S_r e m e correção por opções típicas de equipamentos. Através da equação (47), é possível estimar o custo de eletrolisadores de 100Nm³/h (8,99 kg/h) e 1000 Nm³/h (89,9 kg/h), apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Custo dos eletrolisadores

Capacidade do eletrolisador [Nm ³ /h]	Custo do eletrolisador [US\$]
100	867623,8
1000	3580399,0

Fonte: Própria autora

Através da equação (48) determina-se pode-se determinar o custo de investimento no eletrolisador, de acordo com a capacidade de produção de biohidrogênio.

$$C = C_r * \left(\frac{S}{S_r}\right)^m \quad (48)$$

Onde:

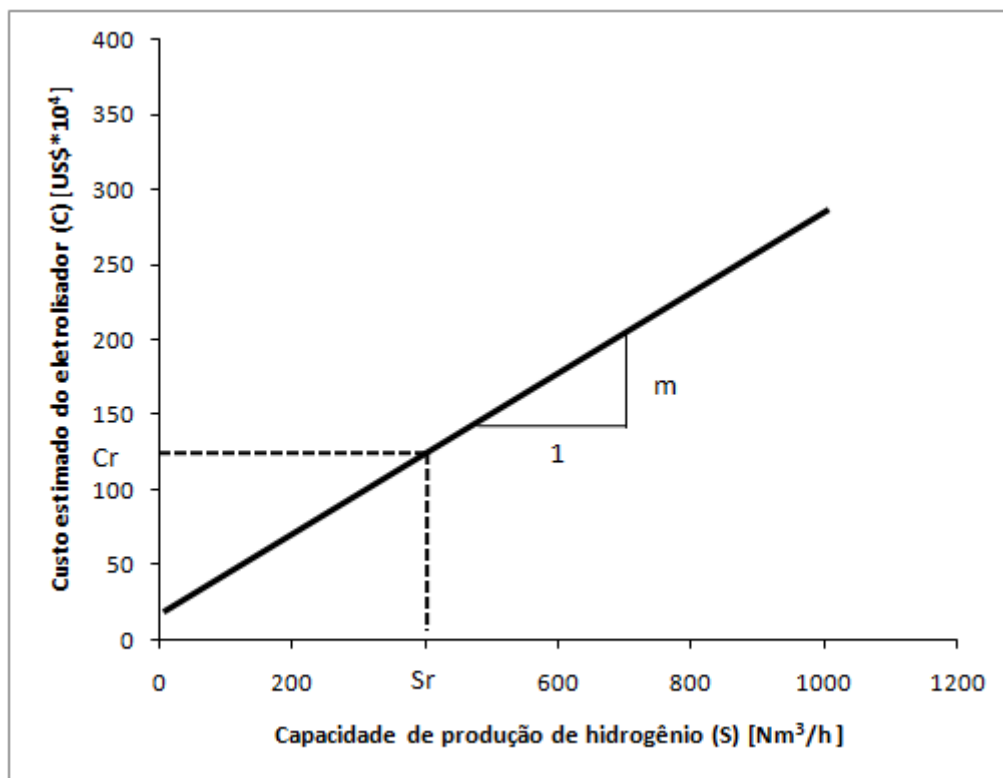
C :custo do equipamento para uma grandeza de interesse S [US\$]

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

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

A Figura 16 apresenta a aplicação da metodologia de Boehm para determinação do custo de investimento de eletrolisar, considerando os valores da Tabela 9.

Figura 16: Metodologia para determinação do custo de investimento de eletrolisador



Fonte: Própria autora

Tem-se assim a equação (49) para a determinação do custo de investimento de eletrolisador para a faixa de 100 a 1000 Nm³/h.

$$Inv_{eletrolisador} = 150 * \left(\frac{m_{H_2}}{400} \right)^{0,71} * 10^4 \quad (49)$$

Onde:

$Inv_{eletrolisador}$: investimento no eletrolisador [US\$]

m_{H_2} : capacidade de produção de biohidrogênio [Nm³/h]

A equação (50) permite calcular o custo de operação do eletrolisador.

$$C_{op\text{eletrolisador}} = \frac{\dot{E}_{req.} * Cel_{MCI}}{\dot{E}_{H_2}} + \frac{\dot{m}_{H_2O} * P_{H_2O}}{\dot{E}_{H_2}} \quad (50)$$

Onde:

Cel_{MCI} : custo de eletricidade produzida no motor de combustão interna [US\$/kWh]

$C_{op\text{eletrolisador}}$: custo de operação do eletrolisador [US\$/kWh]

$\dot{E}_{req.}$: eletricidade requerida no eletrolisador [kW]

$\dot{E}_{H_2}$: potência suprida pelo biohidrogênio [kW]

$\dot{m}_{H_2O}$: fluxo mássico de água no eletrolisador [kg/h]

P_{H_2O} : Preço de compra de água [US\$/kg]

O custo de eletricidade produzida no motor de combustão interna a biogás foi calculado através da equação (51), de acordo com BRIZI, et. al. (2014).

$$Cel_{MCI} = \frac{I_{MCI} * f}{H * E_p} + \frac{\dot{E}_{biogásMCI} * C_{biogás}}{E_p} + C_{manMCI} \quad (51)$$

Onde:

$$\dot{E}_{biogásMCI} = \dot{m}_{biogásMCI} * PCI_{biogás} \quad (52)$$

Onde:

$C_{biogás}$: custo do biogás [US\$/kWh]

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

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

$\dot{E}_{biogásMCI}$: potência suprida pela queima do biogás no motor de combustão interna [kW]

E_p : potência elétrica produzida no motor de combustão interna [kW]

H : período equivalente de utilização [h/ano]

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

$\dot{m}_{biogásMCI}$: consumo de biogás no motor de combustão interna [kg/s]

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

Para o custo de investimento do MCI foi considerado o preços corrigidos pelo índice inflação de Portugal, visto que Alcântara (2012) sugere valores de investimento conforme indicados na Tabela 13.

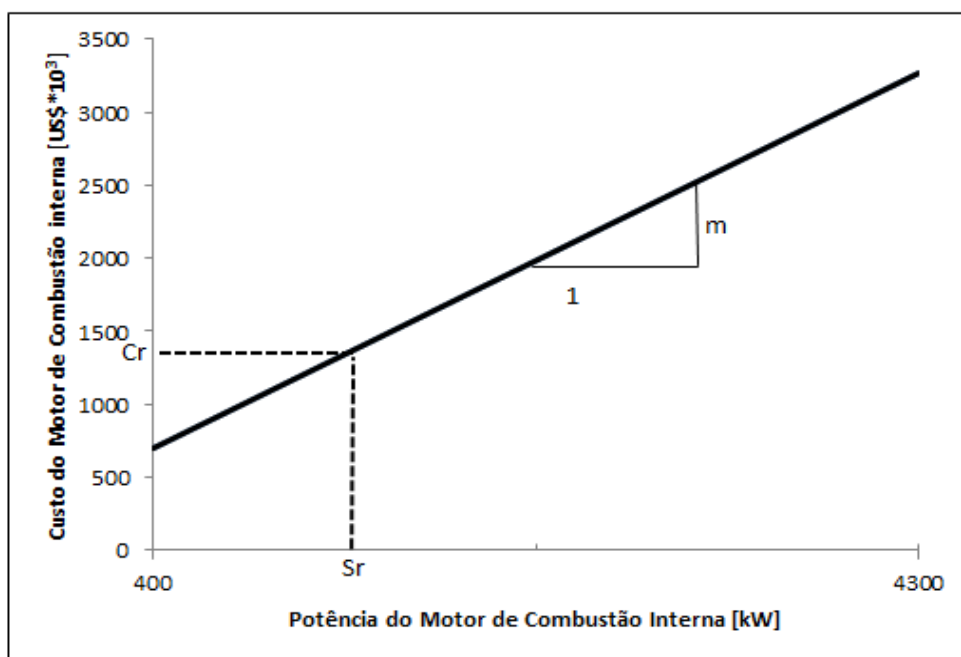
Tabela 13: Custo de motores de combustão interna

Capacidade [kW]	Custo [US\$]
400	640000
4300	1320000

Fonte: ALCÂNTARA (2012)

Aplicando a equação (48) e utilizando a metodologia da Técnica de Boehm (1987) apresentada na Figura 17, pode-se determinar o custo de investimento do motor de combustão interna na faixa de 400 a 4300 kW, equação (53).

Figura 17: Metodologia para determinação do custo de investimento de MCI/Gerador



Fonte: Própria autora

$$I_{MCI} = 1350 * \left(\frac{E_p}{1175} \right)^{0,58} * 10^3 \quad (53)$$

Onde:

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

E_p : potência elétrica do motor de combustão interna [kW]

De acordo com Brizi, et. al. (2014), o custo de manutenção do motor de combustão interna é 0,0130 US\$/kWh.

Segundo Silveira (2017), o custo de manutenção do processo de eletrólise pode ser considerado como sendo 3 % do custo de investimento da planta, conforme equação (54).

$$Cman_{eletrolisador} = 0,03 * \frac{Inv_{eletrolisador} * f}{H * \dot{E}_{H_2}} \quad (54)$$

O eletrolisador selecionado requer 2940 kW de eletricidade e o motor selecionado produz 3370 kW, logo o processo produz eletricidade em excesso. Parte desta pode ser aproveitada para os requerimento e manutenção do aterro sanitário, e o excedente pode ser vendido a concessionária local.

Para determinar a receita anual esperada (considerando um eletrolisador e um MCI) obtida pela venda de eletricidade excedente e de biohidrogênio produzido através do processo de eletrólise, pode-se utilizar a equação (55).

$$R = [E_{req.Aterro} * H * (P_{el} - C_{elMCI})] + [(E_p - E_{req.Aterro}/N - E_{req.}) * H * (P_{v.el.exc.} - C_{elMCI})] + [\dot{E}_{H_2} * H * (P_{vH_2} - C_{H_2eletrólise})] \quad (55)$$

Onde:

C_{elMCI} : custo de produção de eletricidade no conjunto MCI/Gerador [US\$/kWh]

$C_{H_2eletrólise}$: custo de produção de biohidrogênio a partir da eletrólise [US\$/kWh]

$\dot{E}_{H_2}$: potência suprida pelo biohidrogênio [kW]

E_p : potência elétrica produzida no motor de combustão interna [kW]

$E_{req.aterro}$: eletricidade requerida no aterro sanitário [kW]

$E_{req.}$: eletricidade requerida no eletrolisador [kW]

H : período equivalente de utilização [h/ano]

N : número de motores no aterro [-]

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

$P_{v.el.exc.}$: Preço de venda de eletricidade excedente [US\$/kWh]

P_{vH_2} : Preço de venda de biohidrogênio [US\$/kWh]

R : receita anual [US\$/ano]

4.1.2 Análise Econômica do Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Quente por Eletrólise

Na análise econômica do processo de eletrólise com produção de biohidrogênio e água quente serão utilizadas as Equações da seção 4.1. Para determinação do custo de produção de biohidrogênio pode ser utilizada a equação (56).

$$C_{el_{MCI}} = \frac{I_{MCI} * f}{H * E_p} + \frac{\dot{E}_{biogásMCI} * C_{biogás}}{E_p} * FP_{ele.q} + C_{manMCI} \quad (56)$$

Onde:

$C_{biogás}$: custo do biogás [US\$/kWh]

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

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

$\dot{E}_{biogásMCI}$: potência fornecida pela queima do biogás no motor de combustão interna [kW]

E_p : potência elétrica produzida no motor de combustão interna [kW]

$FP_{ele.q}$: fator de produção de eletricidade (eletrólise: $H_2 + H_2O$ quente) [-]

H : período equivalente de utilização [h/ano]

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

$\dot{m}_{biogásMCI}$: consumo de biogás no motor de combustão interna [kg/s]

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

O custo de produção de água quente no trocador de calor é determinado pela equação (57) (BRIZI et al., 2014).

$$C_{H_2O,q} = \frac{Inv_{TC} * f}{H * Q_g} + Cop_{TC} + C_{man_{TC}} \quad (57)$$

Onde:

$$Inv_{TC} = 60 * Q_g \quad (58)$$

$$Cop_{TC} = \frac{\dot{E}_{biogásMCI} * C_{biogás}}{Q_g} * FP_g + \frac{\dot{m}_{H_2O} * P_{H_2O}}{Q_g} \quad (59)$$

Onde:

$C_{H_2O,q}$: custo de produção de água quente [US\$/kWh]

$Cman_{TC}$: custo de manutenção do trocador de calor [US\$/kWh]

Cop_{TC} : custo de operação do trocador de calor [US\$/kWh]

f : fator de anuidade [1/ano]

FP_g : fator de produção de água quente (H_2+H_2O quente) [-]

H : período equivalente de utilização [h/ano]

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

$\dot{m}_{H_2O}$: fluxo mássico de água no eletrolisador [m^3/h]

P_{H_2O} : Tarifa de água [US\$/ m^3]

Q_g : fluxo de calor produzido em forma de água quente no trocador de calor [kW]

De acordo com Silveira et al. (2012), o custo de manutenção do trocador de calor é 5% do seu investimento, determinado pela equação (60).

$$Cman_{TC} = 0,05 * \frac{Inv_{TC} * f}{H * Q_g} \quad (60)$$

As equações (61) e (62) permitem a determinação dos fatores de produção de eletricidade e água quente, respectivamente.

$$FP_{ele.q} = \frac{E_p}{E_p + Q_g} \quad (61)$$

$$FP_g = \frac{Q_g}{E_p + Q_g} \quad (62)$$

4.1.3 Análise Econômica do Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Gelada por Eletrólise

Para determinar o custo de produção de biohidrogênio no processo de eletrólise com produção simultânea de água quente são utilizadas as Equações da seção 4.1, e a equação (63).

$$C_{el_{MCI}} = \frac{I_{MCI} * f}{H * E_p} + \frac{\dot{E}_{biogásMCI} * C_{biogás}}{E_p} * FP_{ele.f} + C_{manMCI} \quad (63)$$

Onde:

$C_{biogás}$: custo do biogás [US\$/kWh]

$C_{el_{MCI}}$: custo de eletricidade produzida no motor de combustão interna [US\$/kWh]

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

$\dot{E}_{biogásMCI}$: potência fornecida pela queima do biogás no motor de combustão interna [kW]

E_p : potência elétrica produzida no motor de combustão interna [kW]

$FP_{ele.f}$: fator de produção de eletricidade (H₂+H₂O gelada) [-]

H : período equivalente de utilização [h/ano]

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

Brizi (2014) sugere a equação (64) para a determinação do custo de produção de água gelada no sistema de refrigeração por absorção (SRA).

$$C_{H_2O,g} = \frac{Inv_{SRA} * f}{H * Q_{ref}} + Cop_{SRA} + C_{man_{SRA}} \quad (64)$$

Onde:

$$Cop_{SRA} = \frac{\dot{E}_{biogásMCI} * C_{biogás}}{Q_{ref}} * FP_{ref} + \frac{\dot{m}_{H_2O} * P_{H_2O}}{Q_{ref}} \quad (65)$$

Onde:

$C_{H_2O,g}$: custo de produção de água gelada [US\$/kWh]

$Cman_{SRA}$: custo de manutenção do sistema de refrigeração por absorção [US\$/kWh]

f : fator de anuidade [1/ano]

H : período equivalente de utilização [h/ano]

Inv_{SRA} : custo de investimento do sistema de refrigeração por absorção [US\$]

FP_{ref} : fator de produção de água gelada (H_2+H_2O gelada) [-]

$\dot{m}_{H_2O}$: fluxo mássico de água no eletrolisador [m^3/h]

P_{H_2O} : Tarifa de água [US\$/ m^3]

Q_{ref} : Potência frigorífica do SRA [kW]

De acordo com Andreos (2013) o custo de investimento em SRA com capacidade de 100 TR é de US\$465,84/TR e para um de 1000TR o valor sugerido é de US\$372,67/TR.

Para a determinação de uma equação de investimento em SRA serão considerados os dados apresentados na tabela 14.

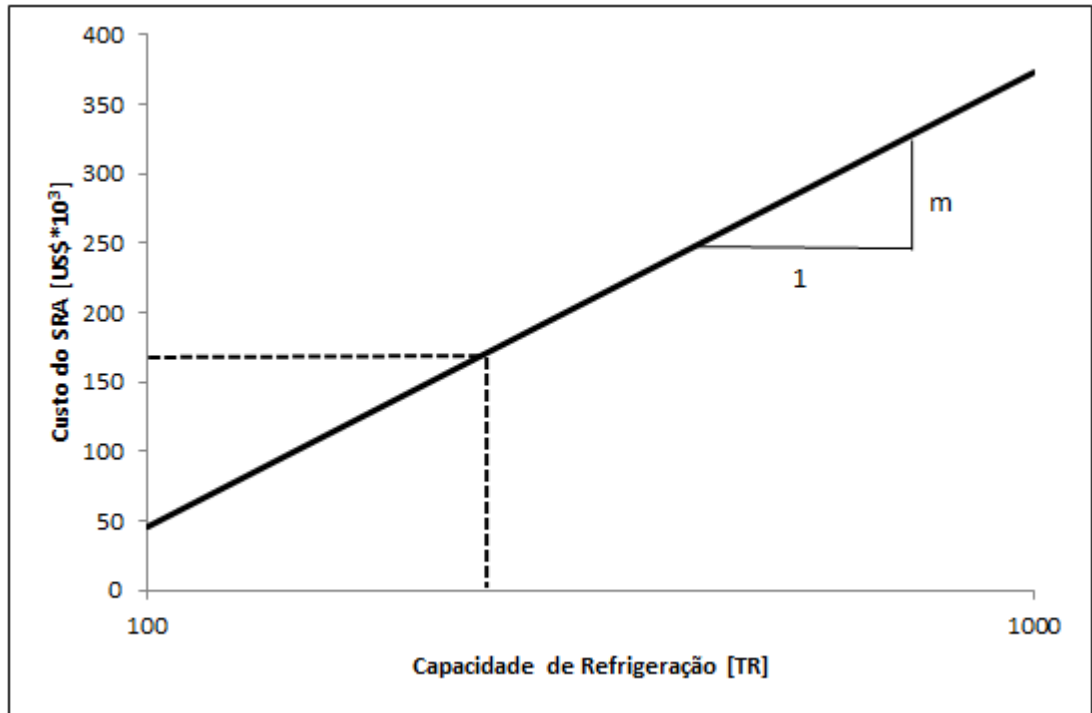
Tabela 14: Custo de sistema de refrigeração por absorção (SRA)

Capacidade [TR]	Preço [US\$]
100	46584
1000	372670

Fonte: Elaboração Própria

Aplicando a metodologia da Técnica de Boehm apresentada na seção 4.1, pode-se obter gráfico da Figura 18, determinou-se a equação (66) para o custo de investimento do sistema de refrigeração por absorção na faixa de 100 a 1000 TR.

Figura 18: Metodologia para determinação do custo de investimento de SRA



Fonte: Própria autora

$$Inv_{SRA} = 200 * \left(\frac{Q_{ref}[TR]}{440} \right)^{0,53} \quad (66)$$

Silveira et al. (2012) sugere a equação (67) para a determinação do custo de manutenção do sistema de refrigeração por adsorção (10% do investimento).

$$Cman_{SRA} = 0,1 * \frac{Inv_{SRA} * f}{H * Q_g} \quad (67)$$

O fator de ponderação de produção de eletricidade e água gelada é determinado segundo as equações (68) e (69), respectivamente.

$$FP_{ele.f} = \frac{E_p}{E_p + Q_{ref}} \quad (68)$$

$$FP_{ref} = \frac{Q_{ref}}{E_p + Q_{ref}} \quad (69)$$

4.2 Análise Econômica do Processo de Reforma a Vapor do Biogás

O custo de produção do biohidrogênio a partir da reforma a vapor do biogás pode ser determinado pela equação (70) (Silveira, 2017).

$$C_{H_2reforma} = \frac{Inv_{reformador} * f}{H * \dot{E}_{H_2}} + Cop_{reformador} + Cman_{reformador} \quad (70)$$

Onde:

$C_{H_2reforma}$: custo de produção de biohidrogênio a partir da reforma a vapor [US\$/kWh]

$Cman_{reformador}$: custo de manutenção do reformador [US\$/kWh]

$Cop_{reformador}$: custo de operação do reformador [US\$/kWh]

$\dot{E}_{H_2}$: potência suprida pelo biohidrogênio [kW]

f : fator de anuidade [1/ano]

H : período equivalente de utilização [h/ano]

$Inv_{reformador}$: investimento no reformador a vapor [US\$]

De acordo com Paulino (2014) o custo de investimento do reformador com capacidades na faixa de 100 a 20000 Nm³/h pode ser determinado através da equação (71).

$$Inv_{reformador} = 9900 * \left(\frac{m_{H_2}}{5800} \right)^{0,84} * 10^3 \quad (71)$$

Onde:

$Inv_{reformador}$: investimento no reformador a vapor [US\$]

m_{H_2} : capacidade de produção de biohidrogênio [Nm³/h]

O custo de operação do reformador a vapor pode ser determinado pela equação (76) (Braga, 2014).

$$Cop_{reformador} = \frac{\dot{E}_{biogás.cald} * C_{biogás}}{\dot{E}_{H_2}} + \frac{\dot{E}_{biogás.ref} * C_{biogás}}{\dot{E}_{H_2}} + \frac{\dot{m}_{H_2O} * P_{H_2O}}{\dot{E}_{H_2}} \quad (76)$$

Onde:

$C_{biogás}$: custo do biogás [US\$/kWh]

$Cop_{reformador}$: custo de operação do reformador [US\$/kWh]

$\dot{E}_{biogás.cald}$: potência fornecida pela queima do biogás na caldeira [kW]

$\dot{E}_{biogás.ref}$: potência fornecida pela queima do biogás no reformador [kW]

$\dot{E}_{H_2}$: potência suprida pelo biohidrogênio [kW]

$\dot{m}_{H_2O}$: fluxo mássico de vapor de água utilizado no reformador [m³/h]

P_{H_2O} : Tarifa de água [US\$/m³]

Silveira (2017) recomenda o uso da equação (77) para o custo de manutenção do sistema de reforma vapor, que considera 3 % do custo de investimento da planta.

$$Cman_{reformador} = 0,03 * \frac{Inv_{reformador} * f}{H * \dot{E}_{H_2}} \quad (77)$$

Onde:

$Cman_{reformador}$: custo de manutenção do reformador [US\$/kWh]

$\dot{E}_{H_2}$: potência suprida pelo biobiohidrogênio [kW]

f : fator de anuidade [1/ano]

H : período equivalente de utilização [h/ano]

$Inv_{reformador}$: investimento no reformador a vapor [US\$]

Tendo em vista a capacidade de produção hidrogênio do eletrolisador estudado no item anterior, foi considerada no capítulo anterior, um reformador a vapor de biogás com capacidade de produção de 600 Nm³/h.

Para se determinar a receita anual esperada de um sistema de reforma a vapor de biogás desse porte, pode-se utilizar a equação (78).

$$R = \dot{E}_{H_2} * H * (P_{vH_2} - C_{H_2.reforma}) \quad (78)$$

4.3 Resultados da Análise Econômica

Para obter o custo de produção de biohidrogênio faz-se as seguintes considerações:

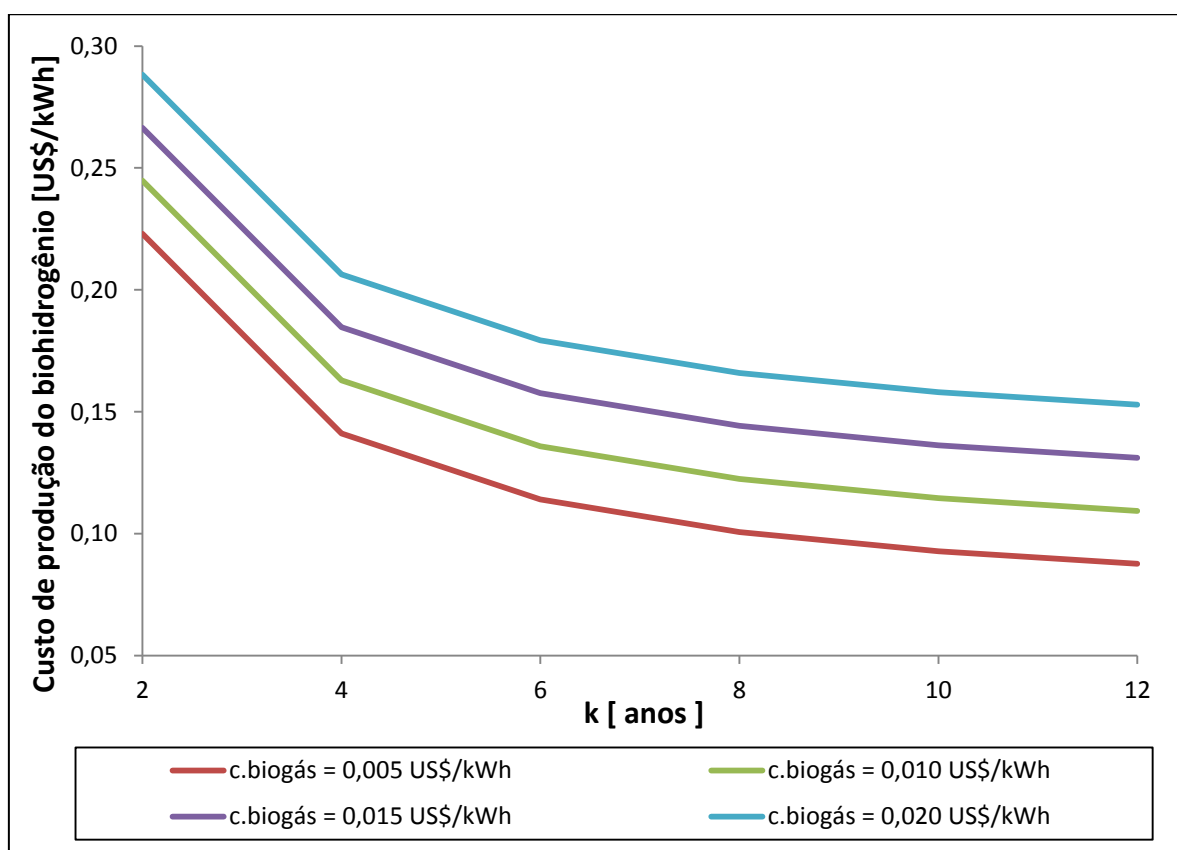
- Tarifa de água para classe industrial da região metropolitana de São Paulo, para consumidores de mais de 50 m³/mês, de 16,10 R\$/m³ (SABESP, 2016).
- Preço de venda de eletricidade excedente produzida a partir biogás no valor de 251 R\$/MWh, de acordo com ANEEL (2016).
- Tarifa de energia elétrica praticada para o setor industrial de 320 R\$/MWh (AES ELETROPAULO, 2017).
- Eletricidade requerida de 200 kW no Aterro Sanitário de Caieras (Figueiredo, 2011).
- Taxas anuais de juros variando em 4, 8 e 12%.
- Período equivalente de utilização do sistema de 8000 h/ano.
- Período de amortização de capital investido, *payback*, variando de 2 a 12 anos.
- Custo de biogás variando de 0,005 a 0,020 US\$/kWh.
- Volume de produção de 600 Nm³/h de biohidrogênio quer seja no eletrolisador ou reformador, a título de compração dos processos.
- Taxa de conversão de 1,00 US\$ = 3,22 R\$.

4.3.1 Resultados da Análise Econômica do Processo de Eletrólise

Os custos de investimentos no eletrolisador e no conjunto MCI/Gerador resultaram de acordo com as equações em US\$ 2.000.396,00 e US\$ 2.487.351,00, respectivamente, capacidade de produção de 600 Nm³/h.

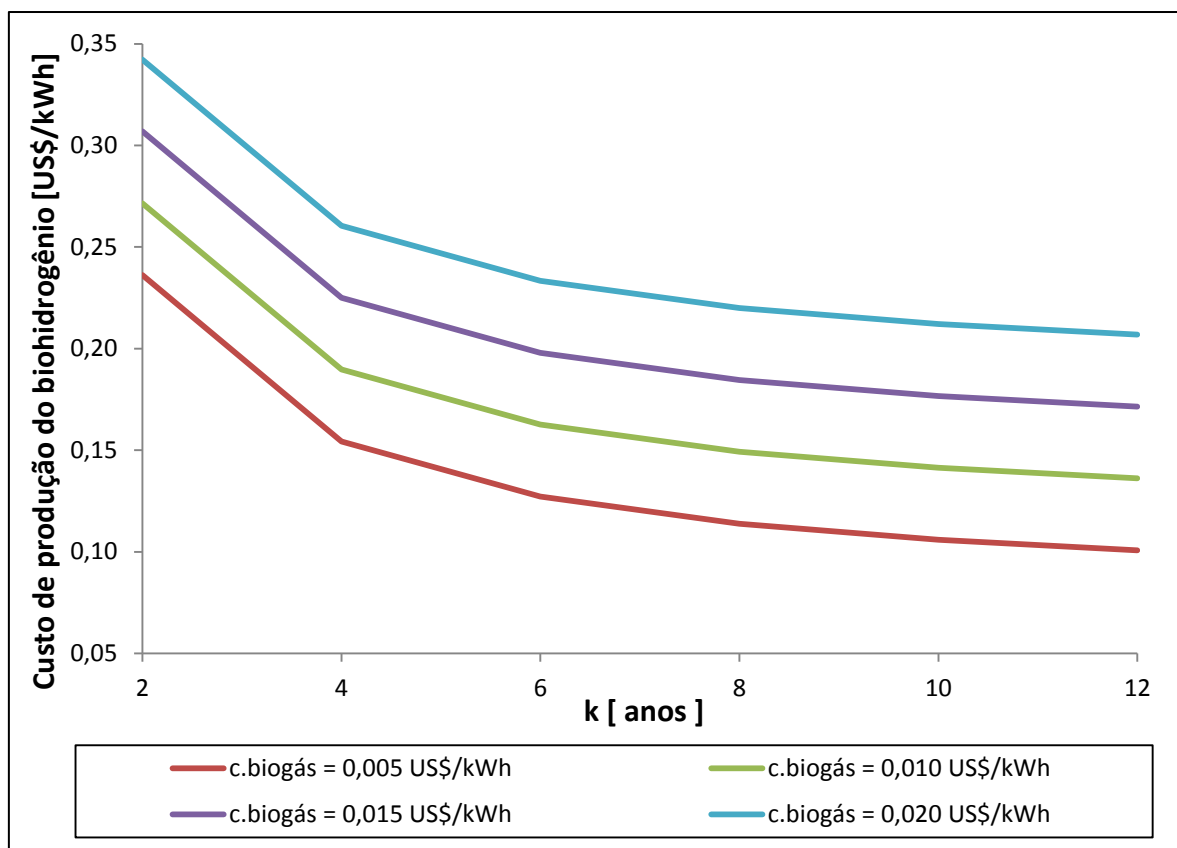
As Figuras 19 e 20 apresentam o custo de produção de biohidrogênio em função do período de amortização de capital (payback) considerando uma taxa anual de juros de 8% e um período de utilização de 8000 h/ano para MCI/Gerador a biogás com eficiência de geração de eletricidade de 43,1% (MCI 43,1%), e eficiência de 26,5% (MCI 26,5%), respectivamente.

Figura 19 : Custo de produção de biohidrogênio por eletrólise, em função do payback, para MCI 43,1%



Fonte: Própria autora

Figura 20: Custo de produção de biohidrogênio por eletrólise, em função do payback, para MCI 26,5%

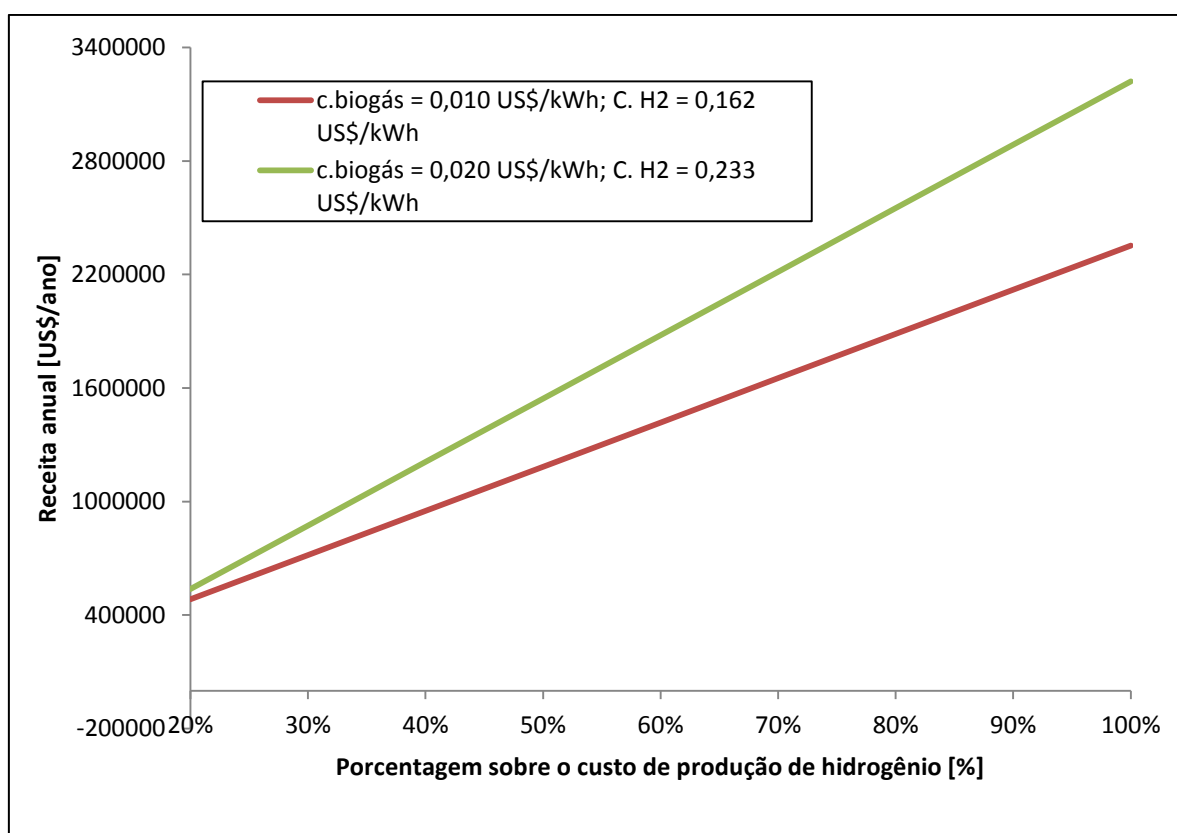


Fonte: Própria autora

Observa-se das Figuras 19 e 20, que o custo de produção do biohidrogênio aumenta de acordo com o aumento do custo do biogás e reduz com o aumento do payback. O custo de produção de biohidrogênio se situa na faixa de 0,09 – 0,29 US\$/kWh para MCI 43,1% e de 0,10 – 0,34 US\$/kWh para MCI 26,5%, tendo em vista a influência da eficiência de geração de eletricidade no consumo de biogás.

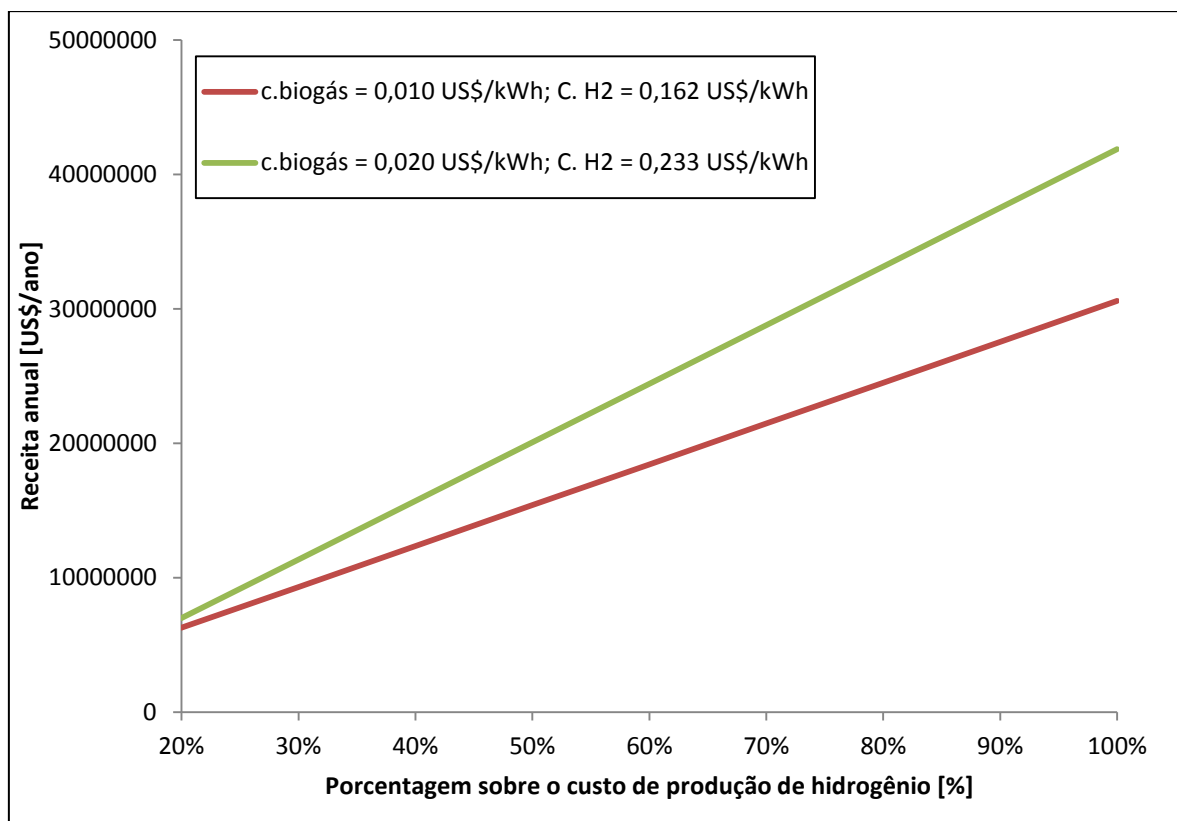
As Figuras 21 e 22 mostra a receita anual esperada em função do percentual estimado de 20 % a 100 % sobre o custo de produção, para o preço de venda de biohidrogênio ao mercado, considerando 8000 h/ano de operação, uma taxa anual de juros de 8% e um valor de payback de 6 anos, capacidade de produção de 600 N/m³ (produção parcial) e para a produção total 7.287,28 Nm³/h de biohidrogênio, considerando os 3 aterros sanitários de São Paulo.

Figura 21: Receita anual esperada em função do preço de venda de biohidrogênio (produção de 600 Nm³/h).



Fonte: Própria autora

Figura 22: Receita anual esperada em função do preço de venda de biohidrogênio (produção total de 7.287,28 Nm³/h).



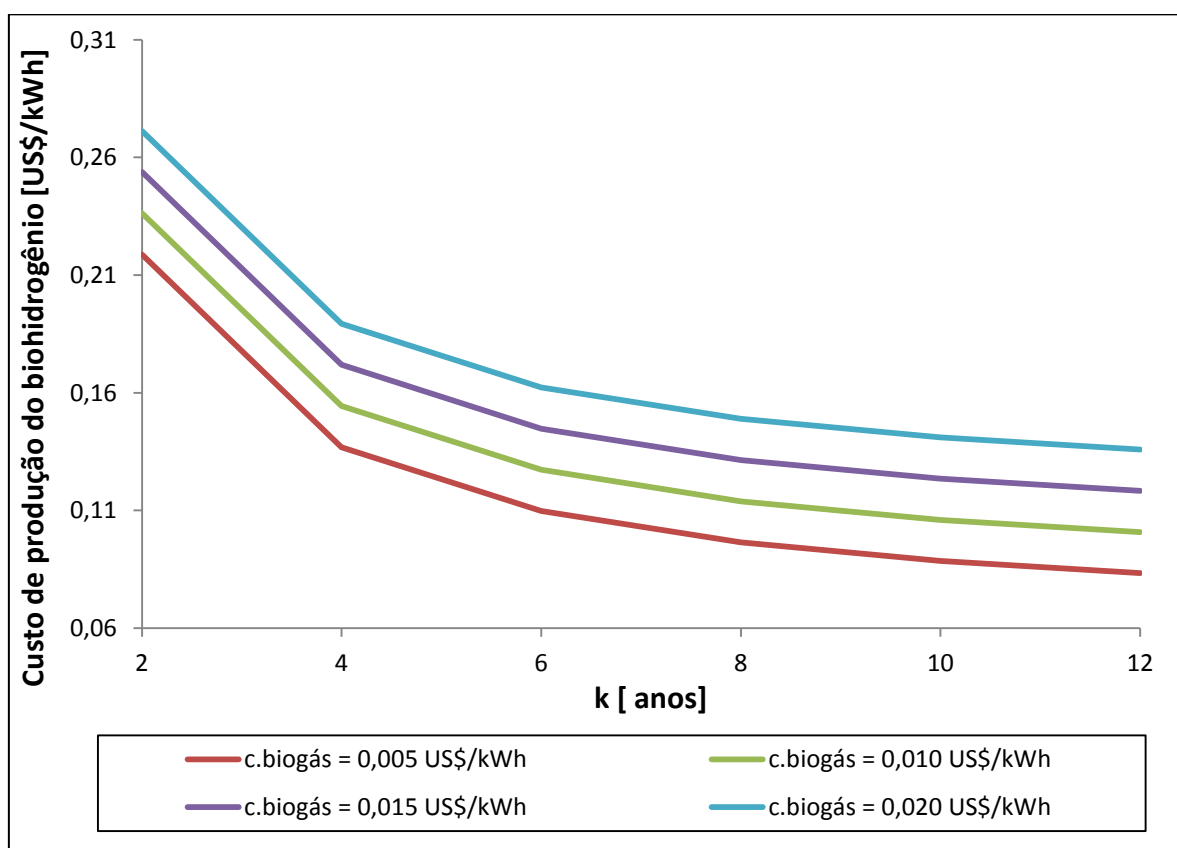
Fonte: Própria autora

Observa-se que a receita anual esperada para uma unidade eletrolisadora de 600 Nm³/h varia entre 482.975,30 a 3.221.566,00 US\$/ano, para preços de venda de biohidrogênio variando de 20 a 100% sobre o custo de sua produção. Considerando a produção total de biohidrogênio dos três aterros (7.287,28 Nm³/h) a receita anual indicada varia entre 6.278.679,00 e 41.880.358,00 US\$/ano.

4.3.1.1 Resultados da Análise Econômica do Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Quente

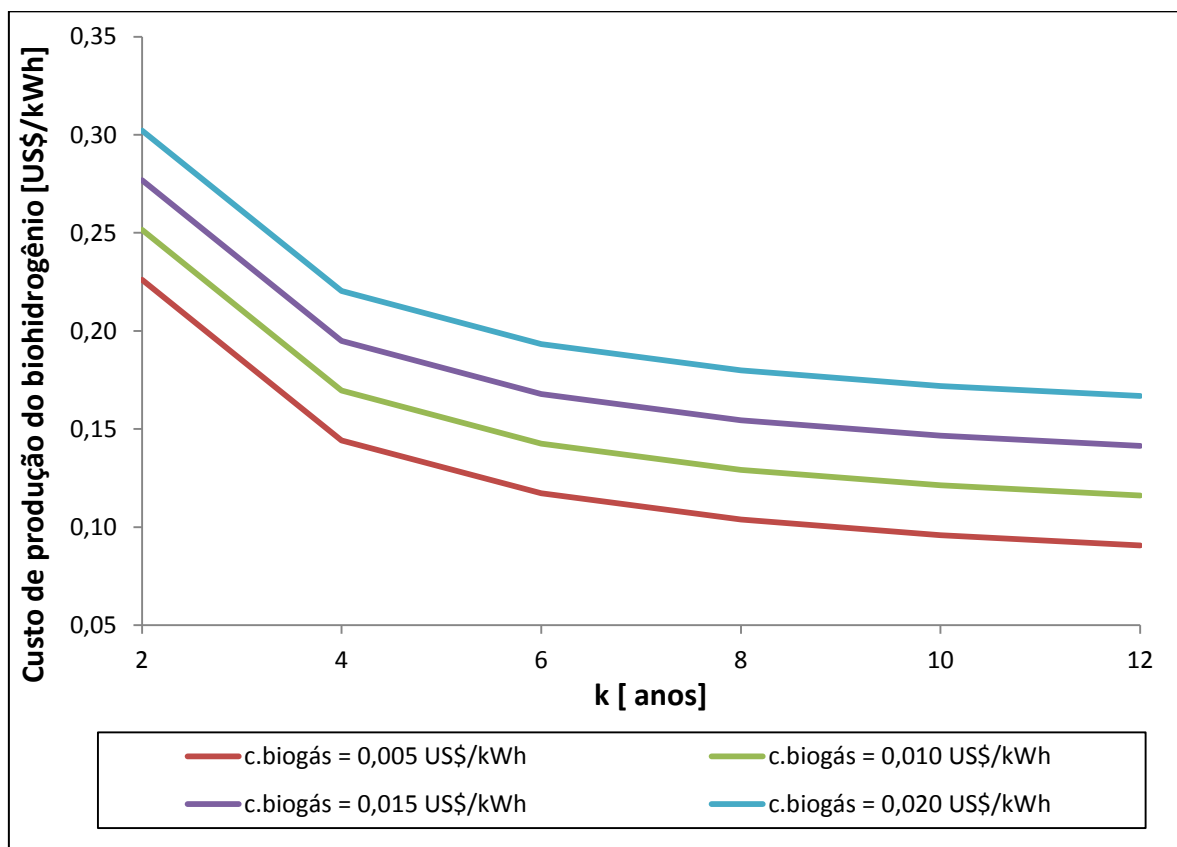
Nas figuras 23 e 24 é apresentada a variação do custo de produção de biohidrogênio em função do payback, considerando uma taxa anual de juros de 8% e um período de utilização de 8000 h/ano para MCI/Gerador a biogás com eficiência de geração de eletricidade de 43,1% (MCI 43,1%), e eficiência de 26,5% (MCI 26,5%), respectivamente.

Figura 23: Custo de produção de biohidrogênio (potencial de Cogeração: Produção de H₂ e água quente), em função payback, para MCI 43,1%



Fonte: Própria autora

Figura 24: Custo de produção de biohidrogênio (potencial de Cogeração: Produção de H_2 e Água Quente), em função payback, para MCI 26,5%



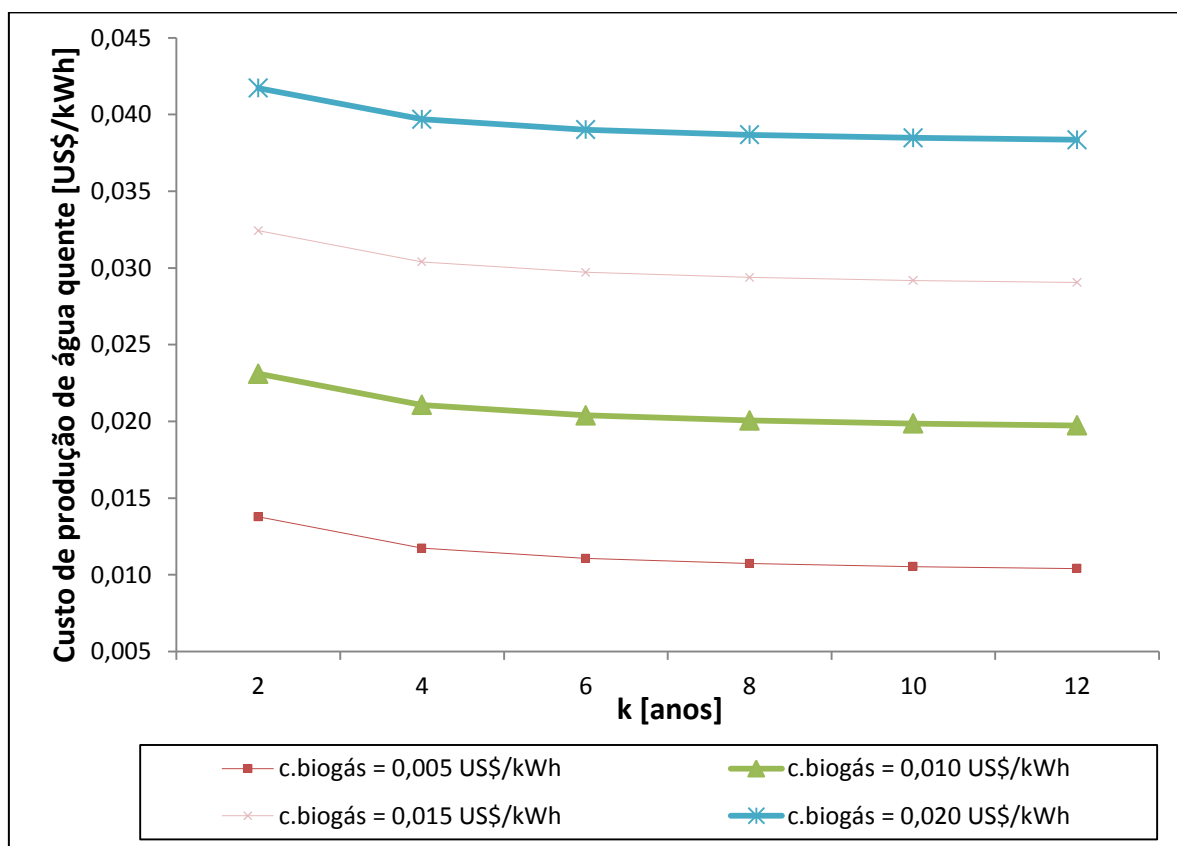
Fonte: Própria autora

Pode-se observar nas figuras 23 e 24, que o custo de produção de biohidrogênio se situa na faixa de 0,08 a 0,27 US\$/kWh para MCI 43,1% e 0,09 – 0,30 US\$/kWh para MCI 26,5%. Isso ocorre devido MCI 26,5% requer uma quantidade maior de biogás quando comparado o MCI 43,1%, consequentemente aumentando deixando o custo de produção de biohidrogênio maior.

Os custos investimentos nos trocadores de calor são de US\$ 49.263,92 e US\$ 80.123,58, considerando os fluxos residuais disponíveis nos gases de escape do MCI 43,1% e MCI 26,5%, respectivamente.

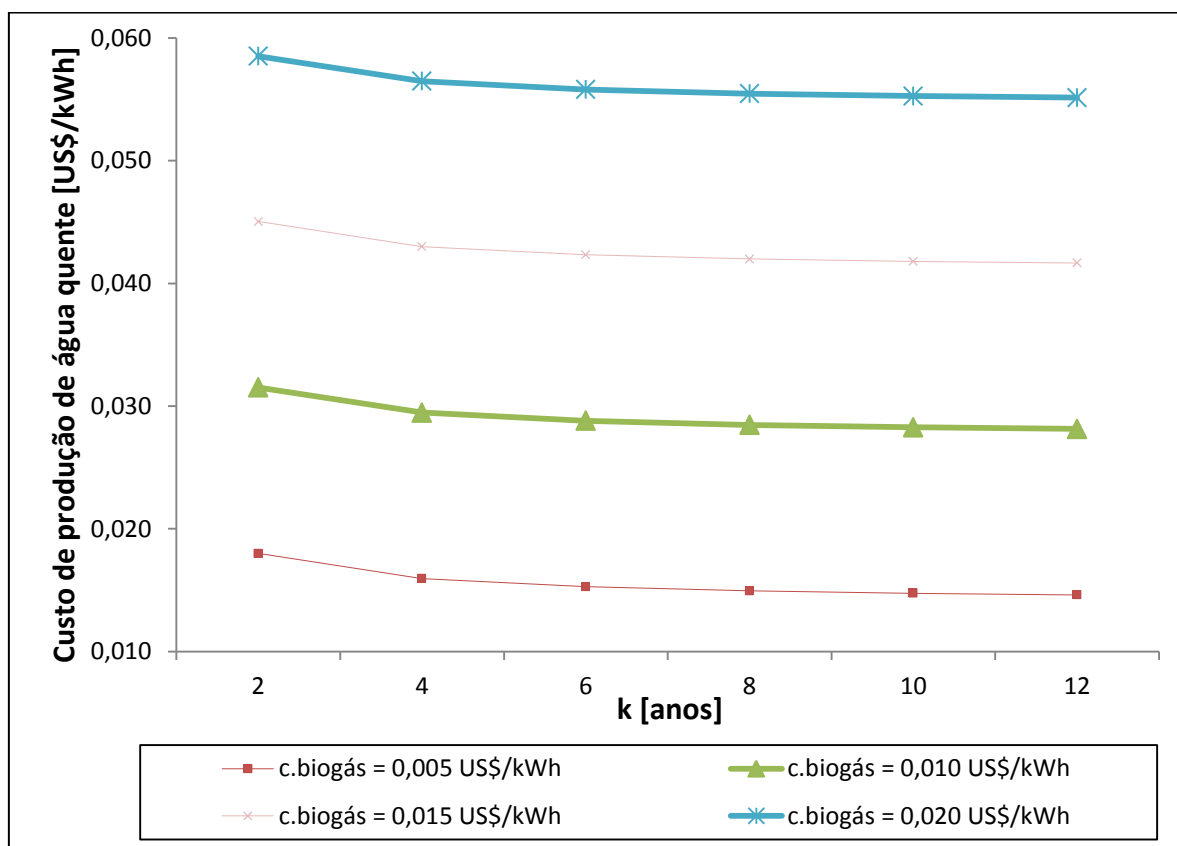
As Figuras 25 e 26 apresentam o custo de produção de água quente a 60 °C. considerando o período de utilização de 8000 h/ano, taxa anual de juros de 8% para os dois níveis de eficiências considerado para o conjunto MCI.

Figura 25: Custo de produção de água quente em função do payback, MCI 43,1%



Fonte: Própria autora

Figura 26: Custo de produção de água quente em função do payback, MCI 26,5%



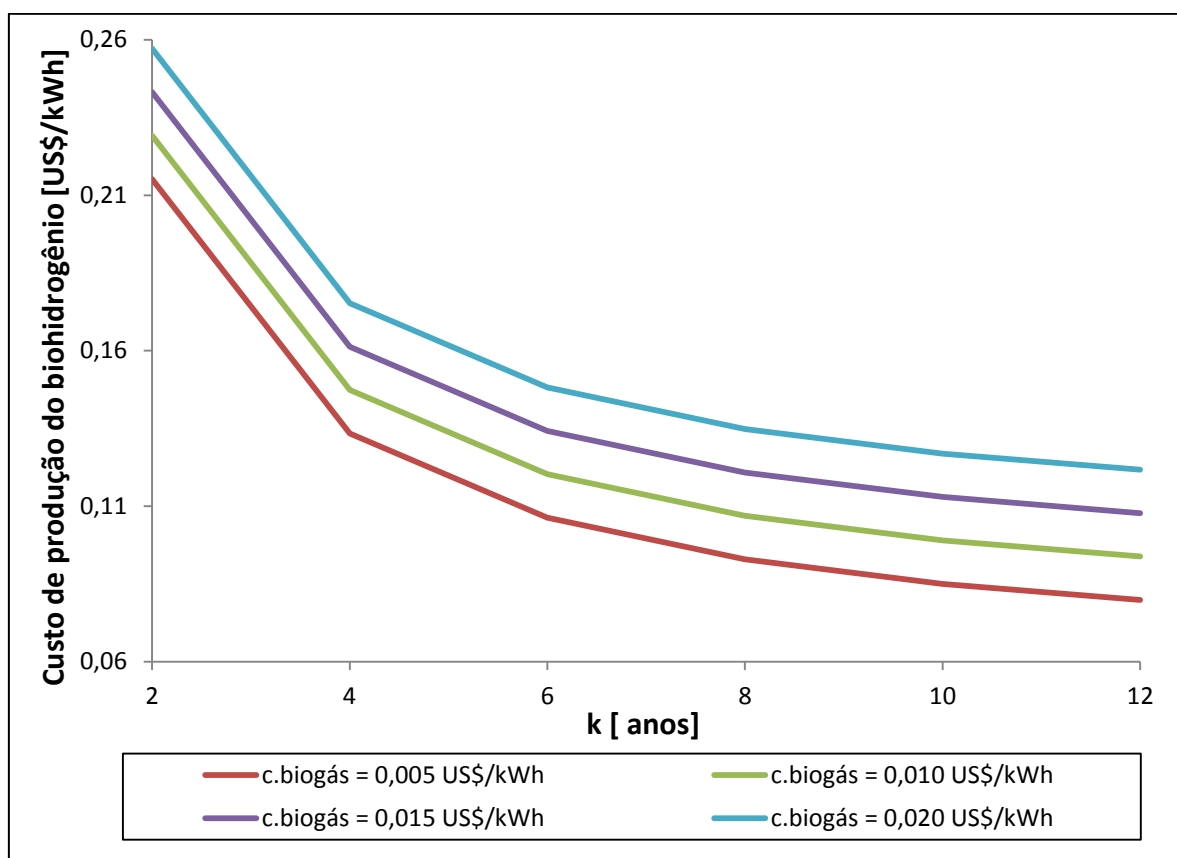
Fonte: Própria autora

Observa-se das figuras 25 e 26 que o custo de produção de água quente é praticamente independente do payback. O custo de produção de água se situa entre 0,010 e 0,042US\$/kWh para MCI 43,1%, e de 0,015 - 0,059 US\$/kWh para MCI 26,5%.

4.3.1.2 Resultados da Análise Econômica do Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Gelada

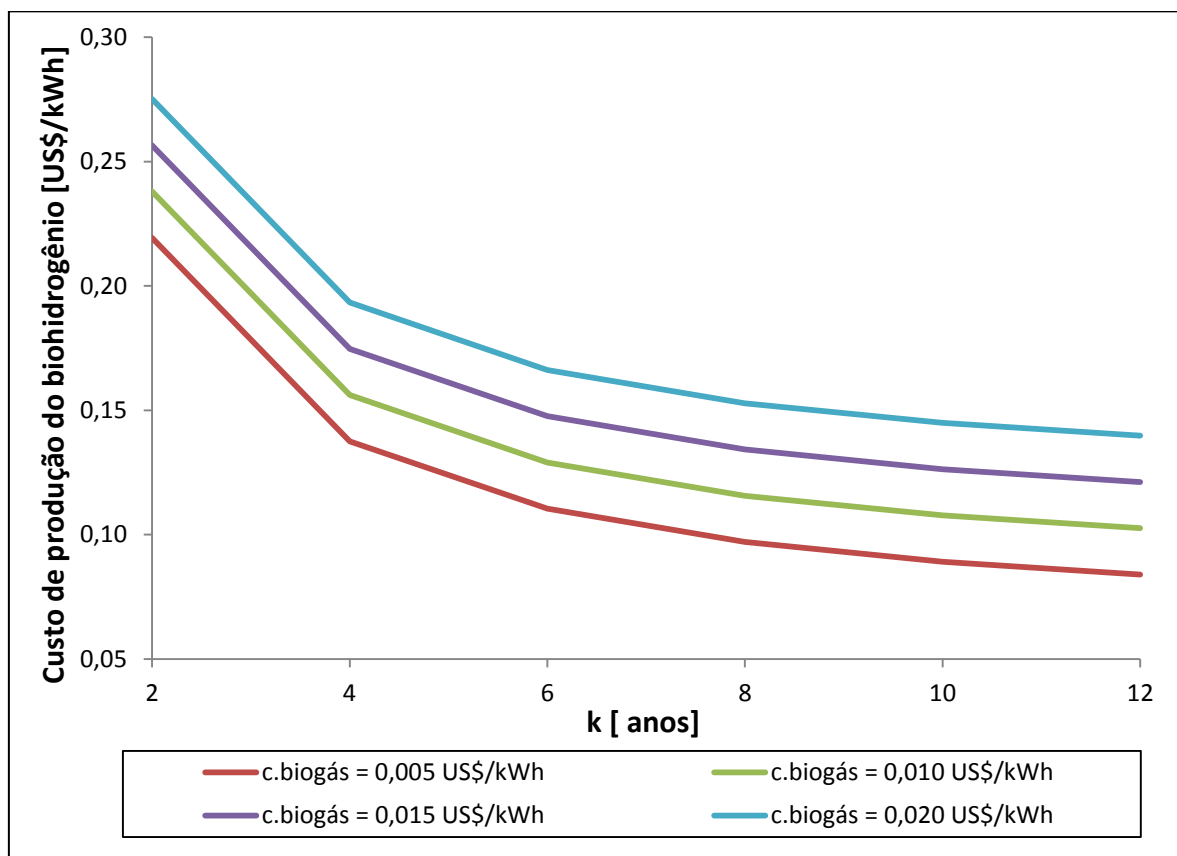
As Figuras 27 e 28 apresentam o custo de produção de biohidrogênio em função do payback, considerando período de utilização de 8000 h/ano e taxa de juros de 8% para MCI 43,1% e MCI 26,5%, respectivamente.

Figura 27: Custo de produção de biohidrogênio (potencial de Cogeração: Produção de H₂ e Água Gelada), em função payback e do custo do biogás, para MCI 43,1%



Fonte: Própria autora

Figura 28: Custo de produção de biohidrogênio (potencial de Cogeração: Produção de H_2 e Água Gelada), em função payback e do custo do biogás, para MCI 26,5%



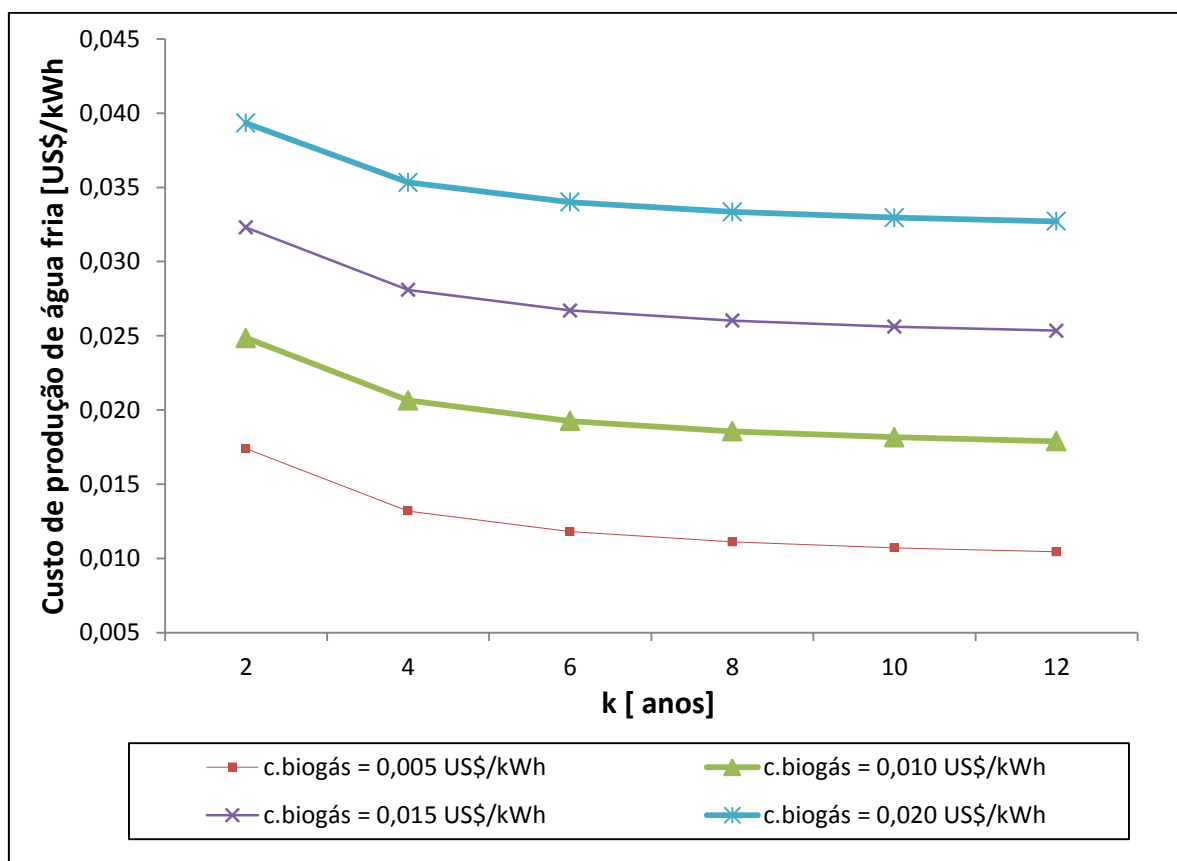
Fonte: Própria autora

Observa-se nas figuras 26 e 27 que o custo de produção de biohidrogênio quando considerada a produção de água gelada está na faixa de 0,08 a 0,26 US\$/kWh para MCI 43,1% e 0,08 -0,28 para MCI 26,5%.

Com análise econômica obteve-se o custo investimento do sistema de refrigeração por absorção no valor de US\$ 221.394,80 e US\$ 286.496,90 considerando para fluxo de calor residual disponível nos gases de escape a partir do MCI 43,1% e MCI 26,5%, respectivamente.

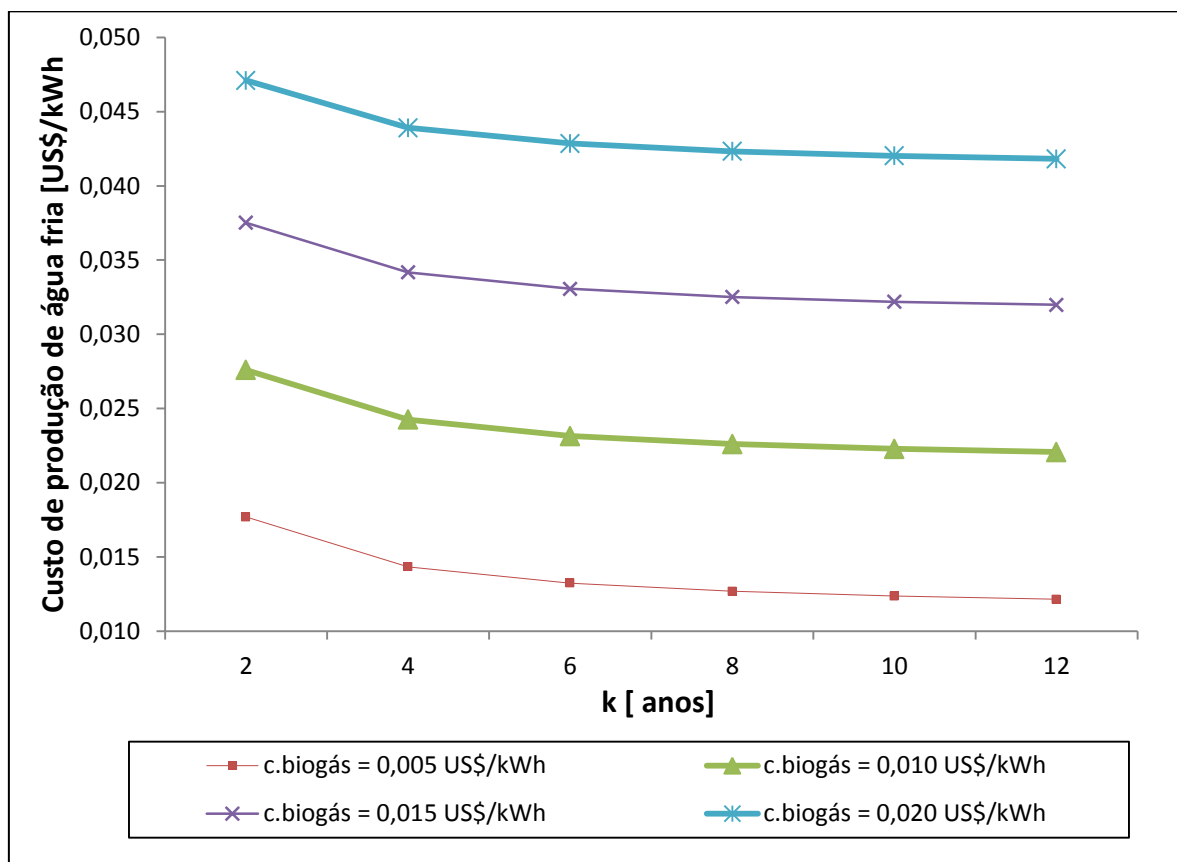
As Figuras 29 e 30 apresenta o custo de produção de água gelada considerando o período de utilização de 8000 h/ano e taxa de juros de 8% em função do payback para MCI 43,1% e MCI 26,5%, respectivamente.

Figura 29: Custo de produção de água gelada, em função do payback e do custo do biogás, MCI 43,1%



Fonte: Própria autora

Figura 30: Custo de produção de água gelada, em função do payback e do custo do biogás, MCI 25,6%



Fonte: Própria autora

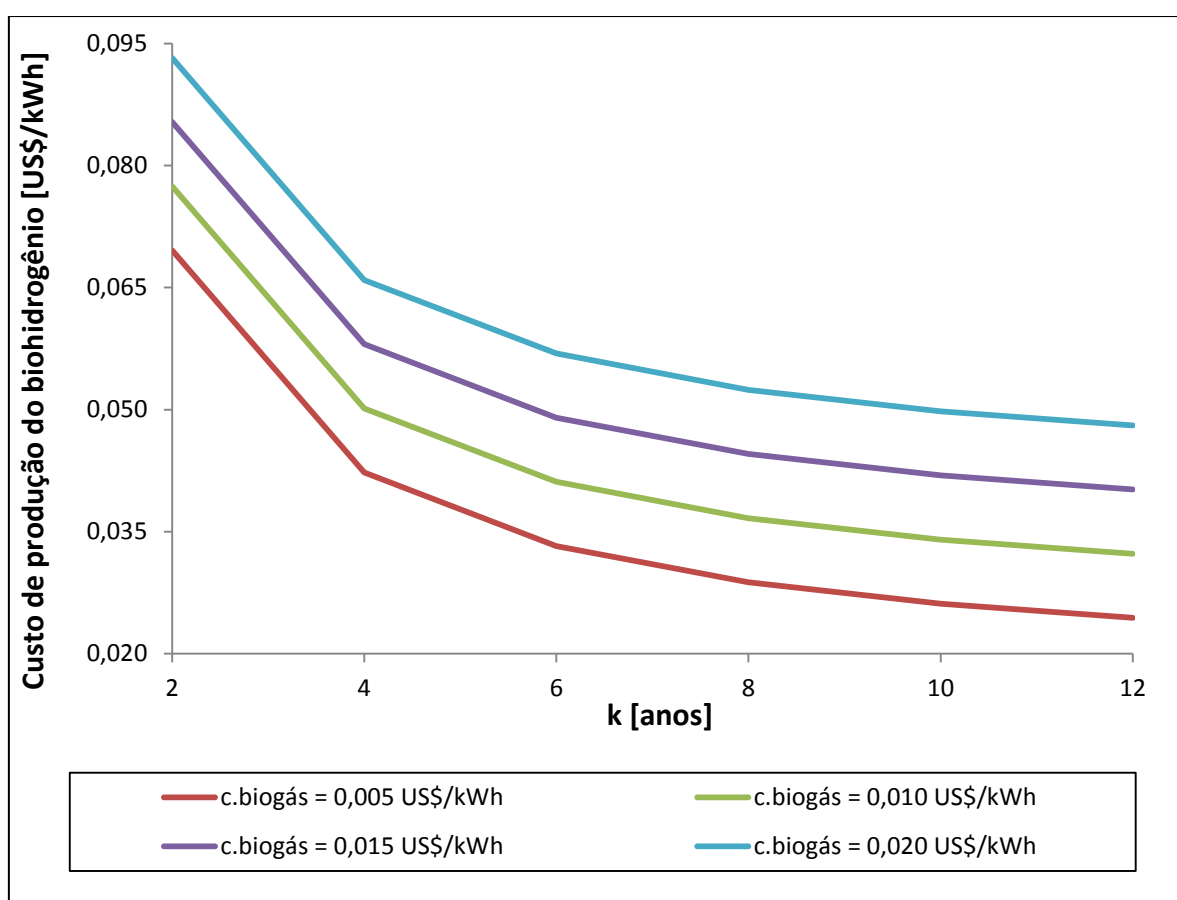
Observa-se nas figuras 29 e 30 que o custo de produção de água gelada é constante para taxa de juros de 4 e 12% a cada valor de custo do biogás. E ainda, que o custo de produção de água varia de 0,010 a 0,039 US\$/kWh para MCI 43,1% e 0,012 – 0,047 para MCI 26,5%.

4.3.2 Resultado da Análise Econômica do Processo de Reforma a Vapor do Biogás

Através da análise econômica do processo de eletrólise obteve-se um custo de investimento do reformador com capacidade de $600 \text{ Nm}^3/\text{h}$ US\$ 1.472.322,00.

A Figura 31 mostra o custo de produção de biohidrogênio pelo processo de reforma a vapor do biogás, considerando a taxa de juros de 8% e 8000 h/ano de operação, em função do payback.

Figura 31: Custo de produção de biohidrogênio por reforma a vapor, em função do período de amortização e do custo do biogás

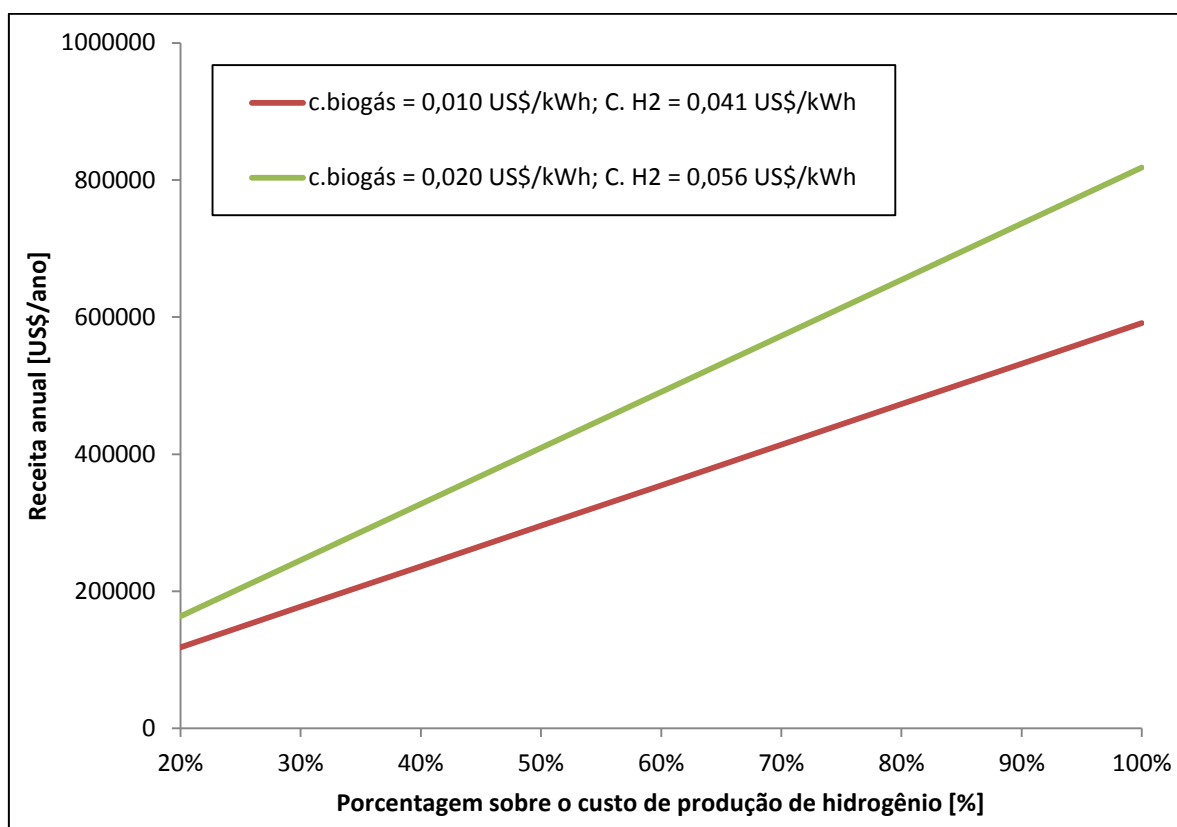


Fonte: Própria autora

Observa-se na Figura 31, que o custo de produção do biohidrogênio aumenta conforme o aumento do custo do biogás e diminui com o aumento do período de amortização. O custo de produção de biohidrogênio situa-se entre 0,024 a 0,093 US\$/kWh.

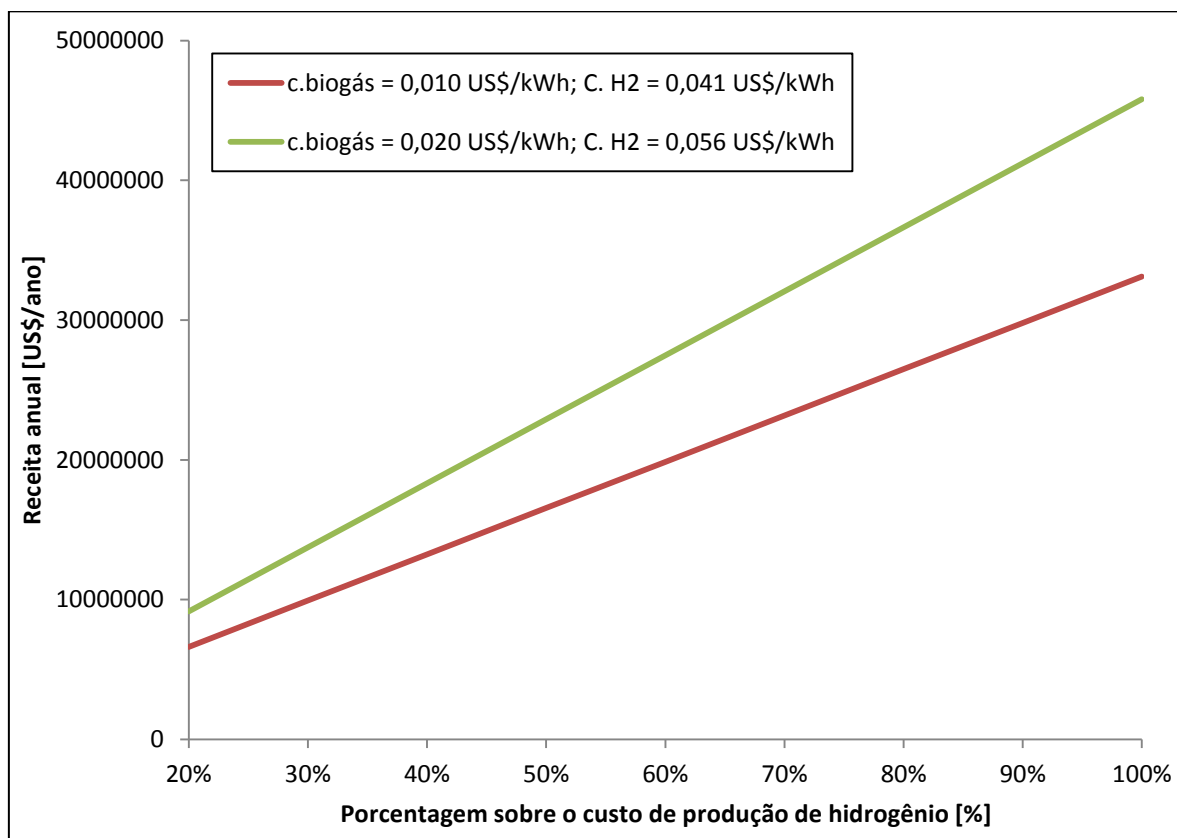
As Figuras 32 e 33 mostram a receita anual esperada em função do percentual estimado (de 20 % a 100 % sobre o custo de produção) para o preço de venda de biohidrogênio ao mercado, considerando 8000 h/ano de operação, e uma taxa anual de juros de 8%, payback de 6 anos e custo de produção de biogás no aterro variando entre 0,010 e 0,020 US\$/kWh para produção de 600 (produção parcial) e 32688,51 Nm³/h de biohidrogênio (produção total), respectivamente.

Figura 32: Receita anual esperada em função do preço de venda de biohidrogênio (produção de 600 Nm³/h).



Fonte: Própria autora

Figura 33: Receita anual esperada em função do preço de venda de biohidrogênio (produção de 32688,51 Nm³/h).



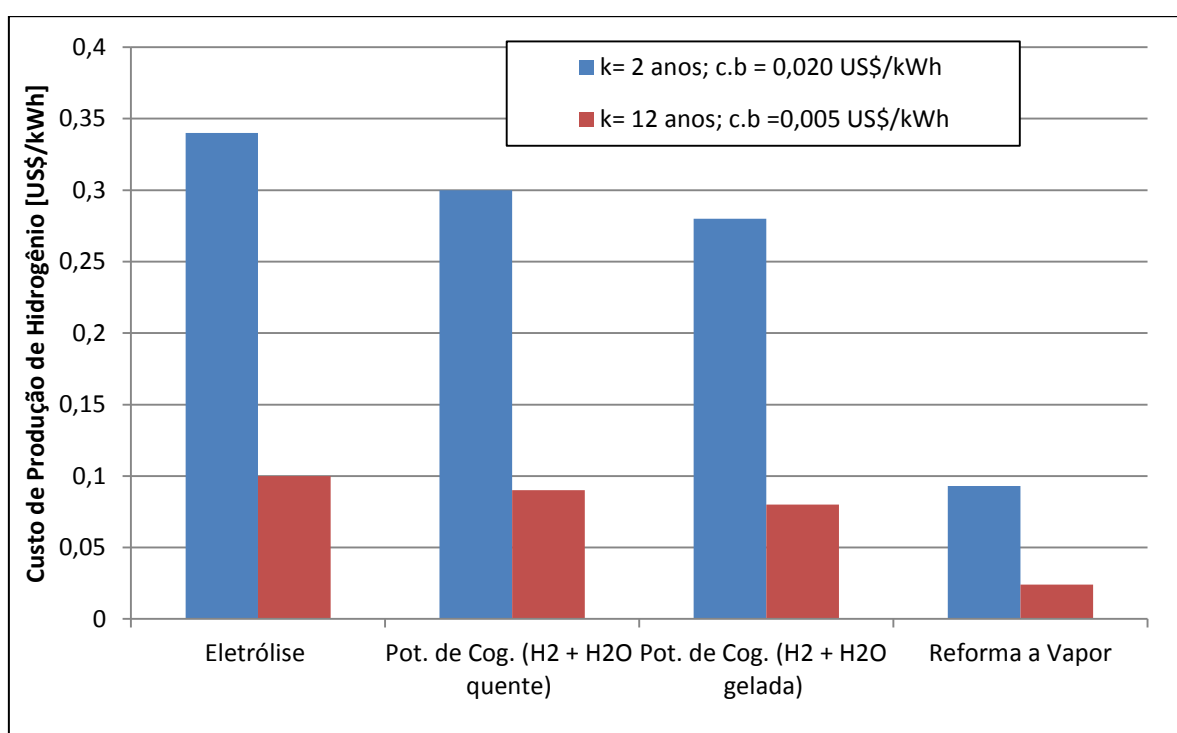
Fonte: Própria autora

Observa-se a receita anual esperada para uma unidade eletrolisadora de 600 Nm³/h varia entre 118.243,80 a 818.019,50 US\$/ano, para preços de venda de biohidrogênio de 20 a 100 % maiores do que o custo de sua produção. E para a produção total de biohidrogênio contabilizando os três aterros (32688,51 Nm³/h) se a receita anual varia entre 6.621.654,00 a 45.809.093,00 US\$/ano.

4.4.3 Comparação dos Resultados da Análise Econômicos

A Figura 34 apresenta o custo de produção de biohidrogênio considerando somente eletrólise, eletrólise com cogeração ($H_2 + H_2O$ quente) e eletrólise com cogeração ($H_2 + H_2O$ gelada) (eficiência do MCI de 26,5%) e reforma a vapor de biogás. Assume-se período de amortização variando de 2 e 12 anos e taxa anual de juros de 8%, 8000 h/ ano de operação e custo do biogás de 0,005 e 0,020US\$/kWh.

Figura 34: Custo de produção do biohidrogênio considerando os diferentes processos

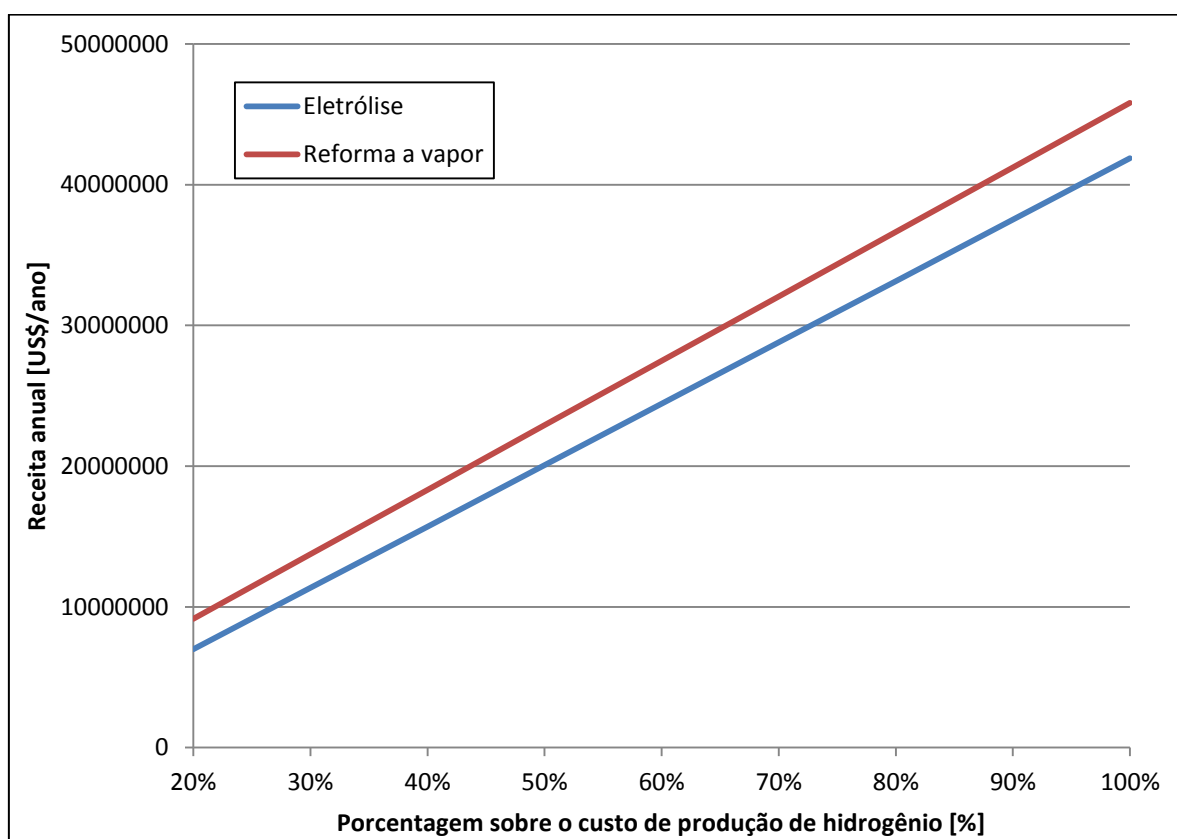


Fonte: Própria autora

Observa-se da Figura 34 que o processo de reforma a vapor apresenta o menor custo de produção de biohidrogênio quando comparado ao processo de eletrólise. Comparando o potencial de cogeração ($H_2 + H_2O$ quente) e potencial de cogeração ($H_2 + H_2O$ gelada), este último apresenta-se com menor custo de produção de biohidrogênio. No processo de eletrólise não foi considerado a comercialização do oxigênio, produto que poderia agregar receitas para aterro.

A Figura 35 apresenta a receita anual esperada em função do percentual estimado (de 20 % a 100 % sobre o custo de produção) para o preço de venda de biohidrogênio ao mercado, considerando 8000 h/ano de operação, taxa anual de juros de 8%, payback de 6 anos e custo de produção de biogás no aterro de 0,020 US\$/kWh para produção de 7287,28 Nm³/h (eletrólise) e 32688,51 Nm³/h de biohidrogênio (reforma a vapor do biogás).

Figura 35: Comparação da receita anual esperada para a produção total de biohidrogênio dos três aterros no processo de eletrólise e reforma a vapor



Observa-se que a receita anual esperada é maior para o processo de reforma a vapor, pois há uma maior produção de biohidrogênio neste processo.

Capítulo 5. ANÁLISE ECOLÓGICA

O estudo da eficiência ecológica é importante para determinar o quão poluente é o processo produção de energia. De acordo com Costa (2011), os gases mais nocivos ao meio ambiente são os mais nocivos são os monóxidos de carbono (CO), os óxidos nitrosos (NO_x), os dióxidos de enxofre (SO₂), os materiais particulados (MP) e os dióxidos de carbono (CO₂).

A análise ambiental de cada processo leva em consideração o cálculo de dióxido de carbono equivalente, o indicador de poluição e a eficiência energética ou global, para que seja determinada a eficiência ecológica.

A eficiência ecológica quantifica o nível de poluição de um sistema, variando de 0 a 1 ou 0 a 100%. O sistema que apresenta uma eficiência igual a 1, significa que não é poluidor e o que apresenta eficiência igual a 0, significa que é muito poluidor (Villela et. al, 2007).

5.1 Dióxido de Carbono Equivalente

Villela et. al. (2007), sugere a equação (79) para a determinação do dióxido de carbono equivalente. Esta equação considera os 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 (MP) no valor de 150 µg/m³ e a concentração máxima de CO₂ de 10000 mg/m³. E também, considerou os padrões de qualidade de ar ditados pela Organização Mundial da Saúde, que para 1 hora de exposição é indicado 200 µg/m³ dióxido de nitrogênio(NO_x) e 125 µg/m³ de dióxido de enxofre(SO_x).

$$(CO_2)_e = M_{CO_2} + 80 * M_{SO_2} + 50 * M_{NO_x} + 67 * M_{MP} \quad (79)$$

Onde:

$(CO_2)_e$: dióxido de carbono equivalente [kg/ kgcomb]

M_{CO_2} : emissão de dióxido de carbono [kg_{CO₂}/kgcomb]

M_{NO_x} : emissão de dióxido de nitrogênio [kg_{NO_x}/kgcomb]

M_{MP} : emissão de material particulado [kg_{MP}/kgcomb]

$MM_{biogás}$: massa molar do biogás [kmol/kg]

De acordo com Villela (2007), a emissão de CO₂ é calculada pela equação (80):

$$M_{CO_2} = \frac{(w*44)_{CO_2}}{MM_{biogás}} \quad (80)$$

De acordo com Carvalho Junior e Lavaca (2003), as emissões de NO_x e MP são calculadas através das equações (81) e (82):

$$M_{NO_x} = \frac{(2120*0,0224)/10^6}{MM_{biogás}*10^{-3}} \quad (81)$$

$$M_{MP} = \frac{(224*0,0224)/10^6}{MM_{biogás}*10^{-3}} \quad (82)$$

Para o cálculo de emissões de dióxido de carbono, dióxido de nitrogênio e material particulado foi utilizada a massa molar do biogás calculada na equação (20), como sendo 52 kmol/kg.

5.2 Indicador de Poluição

O indicador de poluição é a razão entre o dióxido de carbono equivalente e o poder calorífico do combustível e quantifica o impacto ambiental, pode ser obtido através da equação (83) (CARDU; BAICA, 1999; VILLELA, 2007).

$$\Pi_g = \frac{(CO_2)_e}{PCI_{biogás}} \quad (83)$$

$(CO_2)_e$: dióxido de carbono equivalente [kg/ kgcomb]

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

Π_g : indicador de poluição [kg/MJ]

5.3 Eficiência Ecológica

A eficiência ecológica permite avaliar o impacto ambiental das emissões gasosas de processos termoquímicos, considerando o indicador de poluição e a eficiência energética do sistema e pode ser calculada através da equação (84) (SILVA, 2010).

$$\varepsilon = \left[\frac{0,204 * \eta_{sistema} * \ln(135 - \Pi_g)}{\eta_{sistema} + \Pi_g} \right]^{0,5} \quad (84)$$

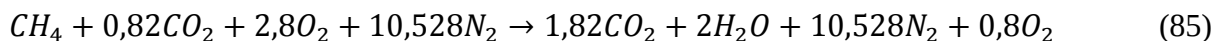
Onde:

ε : eficiência ecológica do processo de eletrólise ou de reforma a vapor [-]

$\eta_{sistema}$: eficiência energética do processo de produção de biohidrogênio [-]

5.4 Análise Ecológica do Processo de Eletrólise e Potencial de Cogeração

Para o cálculo de dióxido de carbono do processo de eletrólise, considerou a combustão do biogás no MCI com 40% (Xavier, 2016) de excesso de apresentado na equação (85).

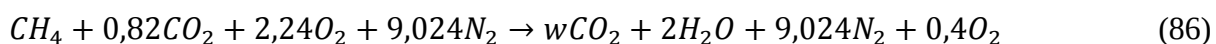


Onde:

$w = 1,82$

5.5 Análise Ecológica do Processo de Reforma a Vapor do Biogás

Para o cálculo de dióxido de carbono do processo de produção de vapor para a reforma, considerou a combustão do biogás na caldeira com excesso de ar de 20% (LORA, 2004), apresentada na equação (86) .



Onde:

$w = 1,82$

Para calcular o dióxido de carbono emitido durante a reforma a vapor, considera-se a equação (87).



5.6 Resultados da análise Ecológica

5.6.1 Resultado da Análise Ecológica do Processo de Eletrólise

Para as emissões de CO_2 , NO_x , SO_2 e MP da queima do biogás no motor de combustão interna (MCI), foram calculados valores apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Emissões de CO_2 , NO_x , SO_2 e MP da queima do biogás no MCI

Componentes	Combustão do biogás
$NO_x [kg_{NO_x}/kg_{comb}]$	$9,13 \cdot 10^{-4}$
$SO_2 [kg_{SO_2}/kg_{comb}]$	-
MP $[kg_{MP}/kg_{comb}]$	$9,65 \cdot 10^{-5}$
$CO_2 [kg_{CO_2}/kg_{comb}]$	1,54

Fonte: Própria autora

Através das emissões apresentadas na Tabela 15 foi possível calcular o dióxido de carbono equivalente, o indicador de poluição e a eficiência ecológica do processo de eletrólise. Os resultados são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Resultado do dióxido de carbono equivalente, indicador de poluição e eficiência ecológica

	Resultado (MCI 43,1%)	Resultado (MCI 26,5%)
Dióxido de carbono equivalente ($(CO_2)_e$) [kg_{CO_2}/kg_{comb}]	1,59	1,59
Indicador de poluição (Π_g) [kg/MJ]	0,1031	0,1031
Eficiência ecológica (ε) [%]	75,84	84,80

Fonte: Própria autora

5.6.1.1 Resultado da Análise Ecológica do Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Quente

A análise ecológica do processo de eletrólise considerando a produção de biohidrogênio e água quente têm as emissões equivalentes indicadas na Tabela 15. O nível de poluição é devido a queima do biogás no motor de combustão interna.

Tendo em vista de que o processo de eletrólise com cogeração apresenta maior eficiência global em relação ao processo que considera somente eletrólise, a eficiência ecológica do primeiro é de (MCI 43,1%) é de 87,46% e (MCI 26,5%) é de 83,98%.

5.6.1.2 Resultado da Análise Ecológica do Potencial de Cogeração: Produção de Biohidrogênio e Água Gelada

A análise ecológica do processo de eletrólise considerando a produção de biohidrogênio e água gelada segue o mesmo padrão apresentado na seção 5.3.1.1. Os valores de eficiências ecológicas, resultam em (MCI 43,1%) de 90,58% e (MCI 26,5%) de 88,74%.

5.6.2 Resultado da Análise Ecológica do Processo de Reforma a vapor

Na análise ecológica da reforma a vapor foi considerado as emissões de CO_2 , NO_x , SO_2 e MP da queima de biogás na caldeira, o resultado está apresentado na Tabela 17.

Tabela 17: Emissões de CO_2 , NO_x , SO_2 e MP da queima do biogás na caldeira

Componentes	Combustão do biogás
$NO_x [kg_{NO_x}/kg_{comb}]$	$9,13 \cdot 10^{-4}$
$SO_2 [kg_{SO_2}/kg_{comb}]$	-
MP $[kg_{MP}/kg_{comb}]$	$9,65 \cdot 10^{-5}$
$CO_2 [kg_{CO_2}/kg_{comb}]$	2,38

Fonte: Própria autora

Neste processo também deve ser contabilizado o CO_2 emitido durante o processo de reforma. Através dos cálculos obteve-se o valor de $0,85 \text{ } kg_{CO_2}/kg_{comb}$.

A Tabela 18 apresenta o dióxido de carbono equivalente, indicador de poluição e eficiência ecológica do processo de reforma a vapor de biogás.

Tabela 18: Resultado do dióxido de carbono equivalente, indicador de poluição e eficiência ecológica

	Resultado
Dióxido de carbono equivalente ($(CO_2)_e$) [kgCO ₂ /kgcomb]	2,48
Indicador de poluição (Π_g) [kg/MJ]	0,16
Eficiência ecológica (ε) [%]	80,10

Fonte: Própria autora

5.6.3 Resultado da Análise Ecológica para Comparação dos Processos

A análise comparativa dos resultados dos estudos ecológicos são apresentadas na Tabela 19.

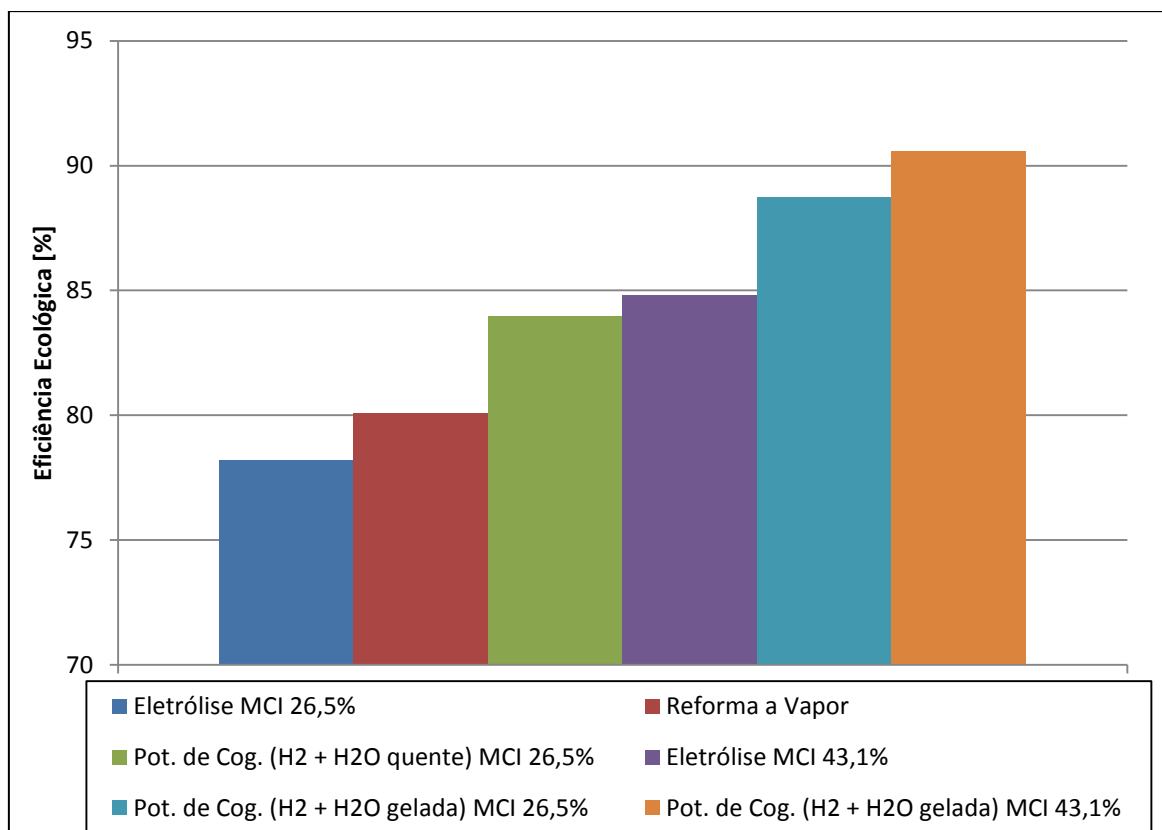
Tabela 19: Resultados da análise ecológica

Processo	Eficiência energética do sistema ($\eta_{sistema}$) [-]	Dióxido de carbono equivalente ($(CO_2)_e$) [kgCO₂/kgcomb]	Indicador de poluição (Π_g) [kg/MJ]
Eletrólise (MCI 43,1%)	0,2634	1,59	0,1031
Eletrólise (MCI 26,5%)	0,1619	1,59	0,1031
Potencial de produção de H ₂ e água quente (MCI 43,1%)	0,3348	1,59	0,1031
Potencial de produção de H ₂ e água quente (MCI 26,5%)	0,2463	1,59	0,1031
Potencial de produção de H ₂ e água gelada (MCI 43,1%)	0,4698	1,59	0,1031
Potencial de produção de H ₂ e água gelada (MCI 26,5%)	0,3812	1,59	0,1031
Reforma a vapor	0,6339	2,48	0,16

Fonte: Própria autora

A Figura 36 apresenta a comparação da eficiência ecológica dos processos em estudo.

Figura 36: Comparação da eficiência ecológica dos processos



Observa-se da figura 36, que considerando o potencial de cogeração (MCI 43,1%) produzindo biohidrogênio e água gelada há maior valor para a eficiência ecológica do processo. Isso ocorre devido ao fato de que esse processo apresenta maior eficiência global do sistema quando comparado com os outros cenários da eletrólise. Esse processo apresenta menor indicador de poluição quando comparado com o processo de reforma a vapor.

Capítulo 6. CONCLUSÕES

Os processos de eletrólise da água operando com eletricidade obtida da queima de biogás no motor de combustão interna e o de reforma a vapor do biogás são rotas importantes para obtenção do biohidrogênio.

A análise energética mostrou que a produção de biogás (50.333 Nm³/h) dos três aterros da região metropolitana da cidade de São Paulo, podem produzir 7.287,28 (MCI 26,5%) – 11.852,15 (MCI 43,1%) Nm³/h de biohidrogênio utilizando processo de eletrólise e 32.688,51Nm³/h de biohidrogênio pelo processo de reforma a vapor. O processo de reforma a vapor é energeticamente mais eficiente (63,39%) do que o de eletrólise (16,19% - (MCI 26,5%)) e 26,34 (MCI 43,1%)). Também é possível concluir que quando se agrega cogeração para a produção de água quente ou de água gelada, ao processo de eletrólise apresenta ganho energético, incrementando a eficiência para 24,63% (MCI 26,5%) e 33,48% (MCI 43,1%) para produção de H₂ e água quente, e 38,12% (MCI 26,5%) e 46,98% (MCI 43,1%) para produção de H₂ e Água gelada.

Através da análise econômica foi possível verificar que o custo de biohidrogênio diminui conforme aumento do período de amortização e aumenta conforme o aumento da taxa de juros. Considerando motor de combustão interna com 43,1% e 26,5% de eficiência de geração de eletricidade, tem-se respectivamente: custo de produção de biohidrogênio obtido pelo processo de eletrólise situa-se entre 0,09 -0,29 US\$/kWh e 0,10 – 0,34US\$/kWh; Para o processo eletrólise utilizando cogeração para produção de água quente, o custo de produção de biohidrogênio ficou entre 0,08 -0,27 US\$/kWh e 0,09 – 0,30 US\$/kWh e o custo de produção de água quente entre 0,010-0,042 US\$/kWh e 0,015 - 0,059 US\$/kWh; Para o processo de eletrólise operando em cogeração com o SRA para produção de água gelada, o custo de produção de biohidrogênio ficou entre 0,08 – 0,26 US\$/kWh e 0,08 – 0,28US\$/kWh e o custo de produção de água gelada entre 0,010 – 0,039 US\$/kWh e 0,012 – 0,047 US\$/kWh. O processo de reforma a vapor apresenta custo de produção de biohidrogênio entre 0,024 e 0,093 US\$/kWh.

A diferença de custo de produção de biohidrogênio entre os processos se deve ao nível de investimento de cada equipamento. No caso de uso de eletrolisadores os valores de investimentos são mais elevados. No estudo comparativo o processo de reforma a vapor mostrou-se mais vantajoso economicamente. E ainda, que agregando a produção de água gelada e quente junto ao processo de eletrólise reduz o custo de produção do biohidrogênio, mostrando-se como alternativa econômica para utilização deste sistema.

Com relação a receita anual esperada, o processo de reforma a vapor é o mais indicado quando o objetivo é lucratividade, visto a maior produção, de 2,47 a 4,48 vezes mais biohidrogênio do que o processo de eletrólise a um custo de produção mais menor.

Os resultados da análise ecológica são fortemente influenciados pela eficiência energética e global de cada processo de produção de biohidrogênio. A eficiência ecológica considerando motor de combustão interna com eficiência de geração de eletricidade de 26,5%, é de 78,19% para processo de eletrólise, 83,98% para o potencial de cogeração (H_2+H_2O quente) e 88,74% para o potencial de cogeração (H_2+H_2O gelada). Considerando motor de combustão interna com eficiência de 43,1%, o valor da eficiência ecológica é de 84,80% para processo de eletrólise, 87,46% para o processo com cogeração H_2+H_2O quente e 90,58% para o processo com cogeração de H_2+H_2O gelada. E a reforma a vapor do biogás apresentou eficiência ecológica de 80,10%, indicando que apesar de economicamente viável, os processos de eletrólise com cogeração de H_2 e água gelada ou água quente, são melhores sobre o ponto vista ambiental. Enfim, todos os sistemas colaboram com a redução de gases de efeito estufa, pois o biogás *in natura* (e mesmo sendo queimado em *flare*) emite muito mais gases poluentes do que quando utilizado para geração de energia.

São sugestões para trabalhos futuros:

- Estudos exergéticos dos processos
- Estudos termoeconômicos dos processos
- Estudos do processos eletrólise com cogeração (produção de água gelada e água quente simultaneamente)
- Estudos comparativos da produção de biohidrogênio com outros processos que utilizam fontes renováveis e outros sistemas de cogeração.
- Estudos de engenharia econômica considerando a comercialização do oxigênio produzido no processo de eletrólise.

REFERÊNCIAS

ACAR, C.; DINCER I. Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. *Hydrogen Energy*, v. 39, p. 1-12, 2013.

AES ELETROPAULO. Disponível: <https://www.aeseletropaulo.com.br/poder-publico/prazos-e-tarifas/conteudo/tarifa-de-energia-eletrica>. acessado 10/02/2017.

AHMED, S.; KRUMPELT, M. Hydrogen from hydrocarbon fuels for fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 26, p. 291-301, 2001.

ALCÂNTARA A. B. S. G. F., Avaliação Económica e Energética do Dimensionamento de Centrais de Cogeração e Trigeração, Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa, 2012.

AMARAL L.; A Digestão Anaeróbia em ETAR / Conceitos. Disponível: http://www.isep.ipp.pt/files/PPT%20WS%20Redes%20Neuronais_Leonor%20Amaral.pdf. Acessado em 27/04/2017.

ANDREOS R., Estudo de viabilidade técnico-econômica de pequenas centrais de cogeração a gás natural no setor terciário do estado de são paulo. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2013.

ANEEL: <http://www.aneel.gov.br/resultados-de-leiloes> . Acessado em 20/08/2016

ARAÚJO, A. V.; FEROLDI, M.; URIO M. B. uso de biogás em máquinas térmicas. *Journal of Agronomic Sciences*, Umuarama, v.3, n. especial, p.274-290, 2014

ATERROS SANITÁRIOS E TRANSBORDOS. http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/servicos/amlurb/aterros_e_transbordos/index.php?p=4633, acessado 28/03/2016.

AVRAAM, D G.; HALKIDES, T I; LIGURAS, D K.; BEREKETIDOU, O A; GOULA, M A. An experimental and theoretical approach for the biogas steam reforming reaction. *International Journal of Hydrogen*, v. 35, pp.9818-9827, 2010.

BORGNAKKE C., SONNATAG R. E. *Fundamentos da Termodinâmica*. São Paulo, Blucher, 2013.

BRAGA,L.B.;SILVEIRA, J.L.; SILVA, M.E.; TUNA, C.E.; MACHIN, E.B.; PEDROSO, D.T. Hydrogen production by biogas steam reforming: A technical, economic and ecological analysis. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, p. 166-173. 2013.

BRAGA, L. B. Aspectos Técnicos, Econômicos e Ecológicos de Processos de Produção de Biohidrogênio. 2014. 143 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

BRASIL ESCOLA: <http://brasilecola.uol.com.br/quimica/conceito-eletrolise.htm>. Acessado em: 08/06/2016

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*, v. 38, p.193-211, 2014.

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

BOTTON, J. P. Líquidos iônicos como Eletrólitos para Reações Eletroquímicas. 2007, 174 pag. TESE (Ciências dos Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Abril de 2007.

CANDIANI, G.; SILVA, M. R. M. Análise do biogás no aterro sanitário caieiras. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina*, v. 32, n. 1, p. 69-77, 2011.

CARDU, M.; BAICA. M. Regarding a Global Methodology to Estimate the Energy-Ecologic Efficiency of Thermopower Plants. *Energy Conversion and Management*, v.40, pp. 71-87, 1999.

CARVALHO JUNIOR, J. A.; LACAVA, P. T. “Emissões em processos de combustão”, São Paulo - Brasil: Editora UNESP, 135 p., 2003.

CHERNICHARO, C. A. L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores Anaeróbios. 2.ed. Belo Horizonte: Departamento de engenharia Sanitária e Ambiental, 379p. 2007.

CDR - SECRETARIA MUNICIPAL DE SERVIÇOS DEPARTAMENTO DE LIMPEZA URBANA. Gestão dos Resíduos Sólidos na Cidade de São Paulo.

COMGAS <http://www.comgas.com.br/pt/nossosServicos/Tarifas/Paginas/industrial.aspx> acessado 01/04/2016.

COSTA, A.A.S. Caracterização de Motor Aeronáutico Utilizando Misturas de Gasolina de Aviação e Etanol: Aspectos Fluidodinâmicos, Termodinâmicos e Ecológicos. 2011. 179 f. Teses (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2011.

DAS D, VEZIROGLU T.N., 2001. Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26, 13-28.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M.C.J.P; ROSSI, M.; TAVARES, R. BIODIGESTORES RURAIS: MODELOS INDIANO, CHINÊS E BATELADA. UNESP – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Bauru, São Paulo, 2002.

DINCER I. Green methods for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 37, p. 1954-1971, 2012.

DIRK GERLACH ENGINEER. <http://www.dgengineering.de/Rotary-Kiln-Processes-Pyrolysis.html> acessado 31/03/2016.

ECOURBIS.<http://www.ecourbis.com.br/site/destinacao.aspx?content=aterro-sanitario>

FIGUEIREDO, N. J. V., Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – Estudo de caso., Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Energia. Universidade de São Paulo, USP, 2011.

FONSECA, F. S. T; ARAÚJO, A. R. A.; HENDGES T. L.. Analise de Viabilidade Econômica de Biodigestores na Atividade de Suinocultura na Cidade de Balsas - MA: um Estudo de Caso. In: congresso da sociedade brasileira de economia, administração e sociologia rural. Universidade Estadual do Maranhão. Maranhão, 2009.

FRARE, L. M. Estudos para a implementação de uma planta para remoção de ácido sulfídrico de processos de produção de biogás. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 182p. 2006.

Gaspar R. M. B. L. Utilização de Biodigestores em Pequenas e Médias Propriedades Rurais, com Ênfase na Agregação de Valor: um Estudo de Caso na Região de Rolêdo-PR. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

GENEVIEVE SAUR (Estados Unidos). NREL.Wind-to-hydrogen project: electrolyser capital cost study. [s.l.]: NREL, 2008. 41 p.

GOMES, C.; BARROS, S.; SILVA S., SOUSA E., PINHEIRO M., SANTOS M., RABELO N., ‘ Vias Renováveis de Produção de Hidrogénio.’ Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto, 2012.

HYDROGENICS: <http://www.hydrogenics.com/hydrogen-products-solutions/industrial-hydrogen-generators-by-electrolysis/indoor-installation> acessado 03/04/2016.

JAFFRIN A., BENTOUNES, N.; JOAN, A. M.; MAKHLOUF, S. Landfill Biogas for heating Greenhouses and providing Carbon Dioxide Supplement for Plant Growth. Biosystems Engineering, v. 86, p113–123, 2003.

KOMYAMA, M.; MESONOU, T.; TAKEUCHI, S.; UMETSU, K.; TAKAHASHI, J. Biogas as a reproducible energy source: Its steam reforming for electricity generation and for farm machine fuel. International Congress Series, 1293, p. 234-237, 2006.

KRICH, K.; AUGENSTEIN, D.; BATMALE, J. P. et al. Biomethane from dairy waste: A sourcebook for the production and use of renewable natural gas in California. Califórnia: Clear Concepts, 2005. 282p.

KOTHARI, R.; BUDDHI, D.; SAWHNEY, R.L. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. Renewable & Sustainable Energy Reviews, p. 553-563, 2008.

KUMAR, K. V.; SRIDEVI, V.; RANI, K.; SAKUNTHALA, M.; KUMAR, C. S., A review on production of biogas, fundamentals, applications & its recent enhancing techniques. Chemical Engineering, v. 57, p. 14073-14079, 2013.

LEVIN, D. B.; CHAHINE, R. Challenges for renewable hydrogen production from biomass. International Journal of Hydrogen Energy, v. 35, p. 4962–4969

LONGO, M. A. V.; LAZZARIN, N.; MIGUEZ, T. A. Produção biológica de biohidrogênio. Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina 34p., Florianópolis, 2008.

MACHADO, D. O.; WANDER P. R., Análise de desempenho de um motor ciclo Otto com biogás. Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 16, n. 26, p. 101-220,. 2015

MARINHO, F. A. M.; SOUSA L. Projeto de Pesquisa sobre Sistema de Cobertura de Aterro de RSU para Oxidação Biológica do Metano. Revista Limpeza Pública, v.73, p. 6-13, 2010.

MELLO, A. R.; GRASSI R. Avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás gerado no aterro sanitário do município de francisco beltrão – PR. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica do Paraná UTFPR, Câmpus Francisco Beltrão, 2014.

OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY.
<http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-photoelectrochemical-water-splitting>
 .acessado 31/03/2016.

ONOVWIONA, H. I.; UGURSAL, V. I.; FUNG, A. S. Modeling of internal combustion engine based cogeneration systems for residential applications. *Applied Thermal Engineering*, v.27, p. 848–861, 2007.

PAULINO, R. F. S. Incorporação de novas tecnologias no setor sucroalcooleiro: Produção de biohidrogênio e aumento da oferta de eletricidade.2014. 92 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

SABESP

http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/clientes_servicos/comunicado_04_2015.pdf,
 acessado 03/04/2016.

SANTOS I. F. S., Proposta de um método escalonado para a motorização do Aproveitamento do Biogás Gerado por Aterros Sanitários para Fins de Geração de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI, 2015.

SANTOS, F. M. S. M., Células de Combustível: Uma Tecnologia para a Geração Distribuída, Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra, 2003.

SILVA, M. E., Análise Experimental da Reforma a Vapor do Etanol: Aspectos Técnicos, Econômicos e Ecológicos.”, Tese de doutorado. Faculdade de Engenharia, Campus Guaratinguetá, UNESP, in Portuguese, 2010.

SILVEIRA, J. L.. Sustainable Hydrogen Production Processes. 1. ed. Springer, 2017. v. 1. 185p.

SILVEIRA, J.L.; LAMAS, W.Q.; TUNA, C.E.; VILLELA, I.A.C.; MIRO, L.S. Ecological efficiency and thermoeconomic analysis of a cogeneration system at a hospital. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 16 p. 2894-2906. 2012.

SILVEIRA, J. L. Uma contribuição para modelagem termoeconômica: Otimização da operação e do projeto de sistemas energéticos. Guaratinguetá, 1998. 60 p. Tese Livre Docência, Universidade Estadual Paulista – UNESP.

SORDI, A.; SILVA, E. P.; LOBKOV, D. D.; NETO, A. J. M.; LOPES, D. G. Gaseificação de biomassa e célula a combustível: sistema com célula tipo pemfc. Encontro de Energia no Meio Rural, 2006.

SOUZA, M.M.V.M. Supported nickel catalysts for steam reforming of methane. 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering, 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering. Rio de Janeiro, 2005.

SUSTENTABILIDADE TECNOLÓGICA: <http://sustentabilidade-tecnologica.blogspot.com.br/2011/09/biodigestor-ferramenta-para.html> acessado em 04/06/2016.

TERMOVERDE:

<Http://www.migratio.com.br/leiloes/Informa%C3%A7%C3%B5es%20do%20Projeto%20-%20Termoverde%20Caieiras%20SA.pdf>. Acessado em 28/08/2016.

THEMELIS, N. J.; ULLOA P. A. Methane generation in landfills. Renewable Energy. V. 32 p. 1243–1257, 2007.

THERMAX – Catálogo - <http://www.absorsistem.com/productos/thermax/catalogos>. Acessado 20/05/2016.

VAN ELK, A. G. H. P., Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos. Segala – Rio de Janeiro: IBAM, 2007.

VICENTINI, M. C. Aplicação do Ciclo Rankine Orgânico alimentado termicamente pela queima da casca do arroz e resíduos de madeira. 2011. 62 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ULLEBERG Y., Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 28, p. 21–33, 2003

VILLELA, I.A. C.; SILVEIRA, J. L. Ecological efficiency in thermoelectric power plants. *Applied Thermal Engineering*, v. 27, pp. 840-847, 2007.

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. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia, Campus Guaratinguetá, UNESP, in Portuguese, 2016.

Yingjian L., Qi Q., Xiangzhu H., Jiezhi L., Energy balance and efficiency analysis for power generation in internal combustion engine sets using biogas. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 6, p. 25-33, 2014.

ZAMORANO, M.; PEREZ, J. I. P.; PAVÉS, I. A.; RIDAO, A. R. Study of the energy potential of the biogas produced by an urban waste landfill in Southern Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 11, p. 900-922, 2007.

ZANETTE, A. L. Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 97p. 2009.

ZHANG, C.; SU, H.; BAEYENS, J.; TAN, T. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 38, p. 383–392, 2014.

Anexo

Anexo 1: Catálogo HySTAT™ Hydrogen Station

	HySTAT® 10	HySTAT® 15	HySTAT® 30	HySTAT® 60	Larga Escala
Capacidade [Nm ³ /h]	4 - 10	6 - 15	12 - 30	24-60	120 - 1300
Pressão de operação [bar]	10 ou 25	10	10	10	10
Consumo de energia estimado [kWh/Nm ³]	5,0	5,0	5,0	4,9	4,9
Consumo de água [l/ Nm ³ H ₂]	1,5-2,0				
Temperatura ambiente	+5°C - +40°C				
Pureza	99,9% (99,999% opcional) H ₂ O saturada, O ₂ <1,000 ppm				
Voltagem e frequência	3 x 400/ 480/ 575VAC;50/60HZ				
Opções	Sistema de purificação de biohidrogênio, sistema de tratamento de água, sistema de refrigeração				
Dimensões	1,67x2,53x1,81 m			3,22x2,53x1,81 m	

Disponível: <http://www.hydrogenics.com/wp-content/uploads/renewable-projects-references---grid-balancing-and-ptg.pdf>