

I WORKSHOP LUSO-BRASILEIRO EM BIOENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS MUNICIPAIS - WLBRM 2018

USO DE BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO PARA A PRODUÇÃO DE BIOELETRICIDADE E BIOHIDROGÊNIO

SOFC

Prof. Dr. José Luz Silveira
M Sc. Stefani Colombaroli
Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

2018

RESUMO

- Célula a combustível de óxido sólido **SOFC**: **alta eficiência elétrica**, possibilidade de **aproveitamento de calor**, **vasta gama de combustíveis**.
- Sistema Cogeração: associação da tecnologia de células a combustível de óxido sólido e a utilização de biogás como insumo é realizada através de um sistema de cogeração.
- Reforma externa do Biogás no conjunto Reformador/Câmara de Combustão
- Análises realizadas neste Trabalho:
 - Análises de Desempenho segundo as Leis da Termodinâmica
 - Análise Termoeconômica para concluir sobre a viabilidade financeira
 - Análise Ecológica para mensurar o impacto ambiental

ESTRUTURA

- 1: INTRODUÇÃO
- 2: ESTUDO DA OBTENÇÃO, REFORMA E USO DE BIOGÁS EM SOFC
- 3: METODOLOGIA DE ESTUDO E DESCRIÇÃO DO SISTEMA SOFC ASSOCIADO A REFORMADOR A VAPOR DE BIOGÁS
- 4: DISCUSSÃO DE RESULTADOS
- 5: CONCLUSÕES

INTRODUÇÃO

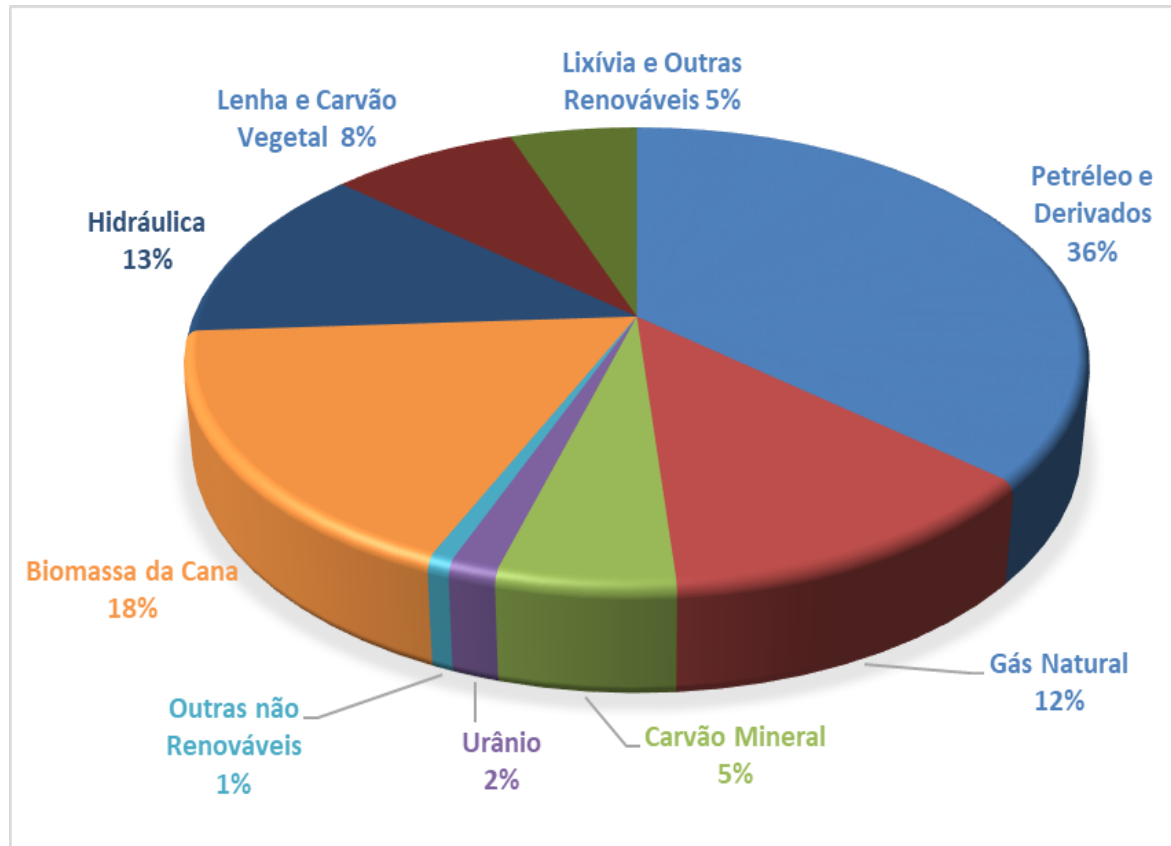


Figura 1: Matriz Energética Brasileira (MME (2017))

INTRODUÇÃO

- **Energia Elétrica:** cerca de 62% da produção total de energia no Brasil é proveniente de usinas hidrelétricas. (2017)
- **Geração de energia centralizada:** Perdas com transmissão 27% das Perdas Totais (Kueck et al., 2004)
- Algumas fontes de energia dependem de **fatores sazonais:** épocas de chuvas e intensidades de ventos e sol variam ao longo do ano
- Biogás: **amplamente disponível, renovável e independente** de fatores sazonais.

ESTUDO DA OBTENÇÃO, REFORMA E USO DE BIOGÁS EM SOFC

Toda e qualquer matéria orgânica rica em carbono pode ser utilizada na produção do **Biogás**.

Esterco da criação de animais, resíduos de abatedouros, sobras de comidas, resíduos de grãos, resíduos de cervejaria, capins, soro de queijo, lixo urbano, esgoto, papéis, entre outros.

Tabela 1: Quantidades de diferentes de insumos para a produção de 1 m³ de Biogás (BARREIRA, 2011)

Insumos	Quantidade (kg)
Esterco fresco de vaca	25
Esterco seco de galinha	5
Esterco de porco	12
Plantas ou cascas de cereais	25
Lixo	20

ESTUDO DA OBTENÇÃO, REFORMA E USO DE BIOGÁS EM SOFC

Resíduos Sólidos Urbanos: conjunto de todos os tipos de resíduos gerados nas cidades e coletados pelo serviço municipal.
Ex: Metal, Papel, Plástico, Vidro, Matéria Orgânica (50% do RSU coletados).

Geração de RSU / População Urbana entre 2007 e 2012

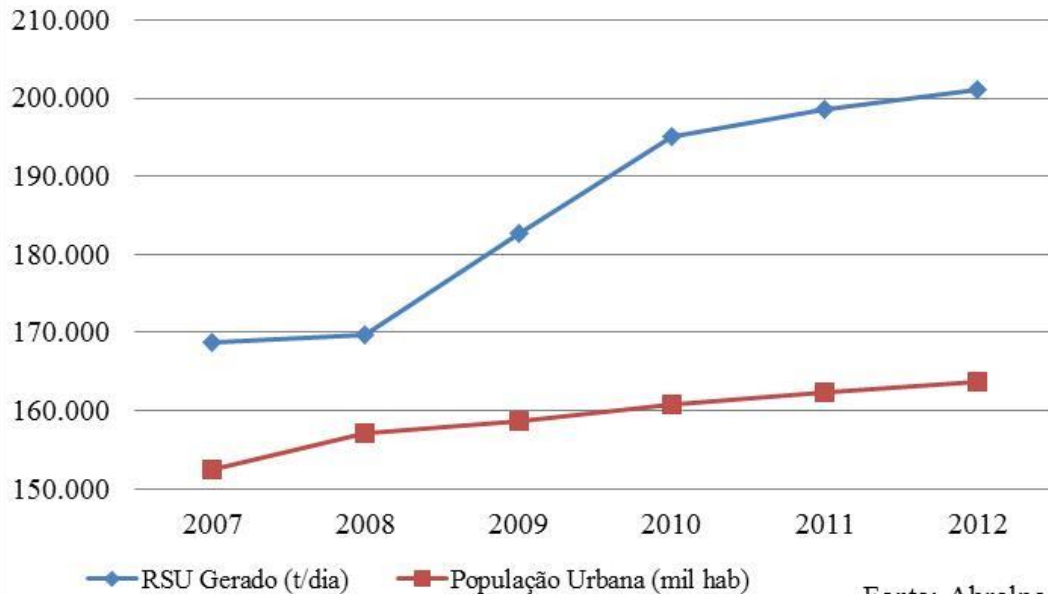


Tabela 2: Índice de Produção de RSU per Capita no Brasil (Abrelpe, 2012)

Ano	Índice de Produção de RSU per capita (kg/habitante/dia)	Variação (%)
2008	1,080	-
2009	1,152	6,67
2010	1,213	5,30
2011	1,223	0,82
2012	1,228	0,41

Figura 3: Gráfico Geração de RSU / Crescimento População Urbana no Brasil

ESTUDO DA OBTENÇÃO, REFORMA E USO DE BIOGÁS EM SOFC

Biodigestores: Principais dispositivos de geração de biogás

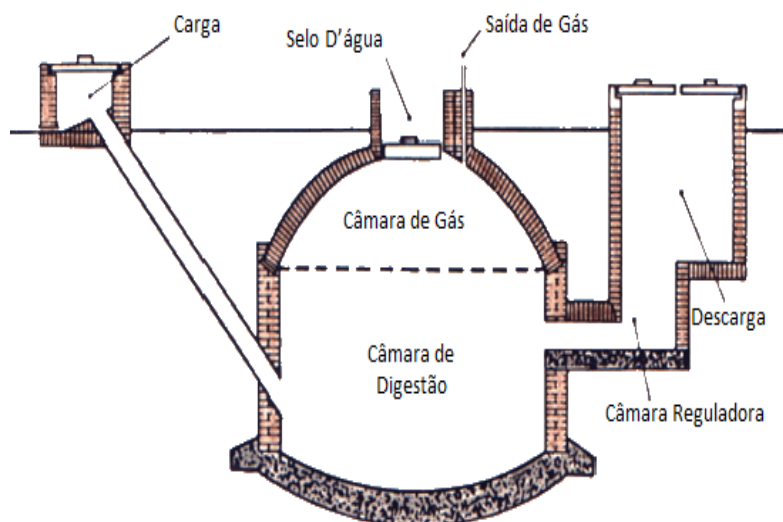


Figura 5: Biodigestor Modelo Chinês (EMAS, 2015)

- Foco na Produção de Fertilizantes
- Sistema Simples e Barato
- Cúpula (Campana) Fixa

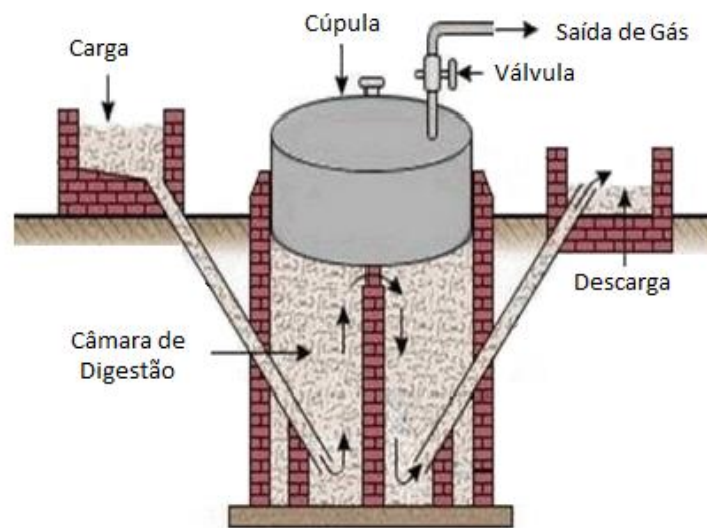
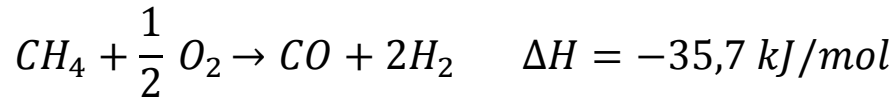


Figura 6: Biodigestor Modelo Indiano (EMBRAPA, 2015)

- Foco na Produção de Biogás
- Sistema mais Sofisticado
- Cúpula Móvel utilizada como gasômetro

ESTUDO DA OBTENÇÃO, REFORMA E USO DE BIOGÁS EM SOFC

Oxidação Parcial



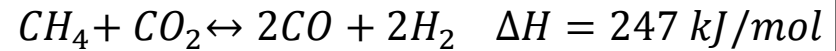
Vantagem:

Reação exotérmica

Desvantagem:

Necessidade de O_2 puro, aumentando custos

Reforma seca ou com CO_2



Vantagem:

Aproveitamento do CO_2 presente no Biogás

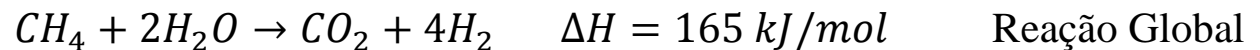
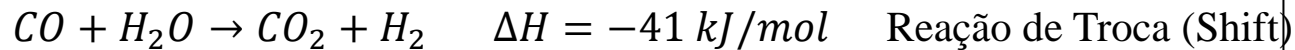
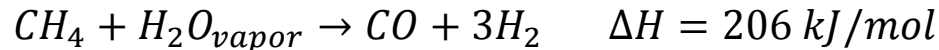
Desvantagem:

Reação Endotérmica, Menor Rendimento

Reforma a Vapor

Vantagem:

Alta conversão,
tecnologia simples,
baixo custo.



Desvantagem:

Reação Endotérmica

ESTUDO DA OBTENÇÃO, REFORMA E USO DE BIOGÁS EM SOFC

CÉLULAS A COMBUSTÍVEL X BATERIAS

BATERIAS:

- **Sistemas Fechados**
- **Eletrodos (ânodo e o cátodo):** Meio de transferência de carga e “massas ativas”
- **Conversão e Armazenamento:** ocorrem no mesmo compartimento
- **Autonomia:** Depende do tamanho da bateria, só enquanto houver reagentes para ocorrer a reação de oxirredução

CÉLULAS A COMBUSTÍVEL:

- **Sistemas Abertos**
- **Eletrodos:** Apenas meio de transferência de carga, as massas ativas são fornecidas a partir do exterior da célula.
- **Conversão:** Dentro da Célula a Combustível
- **Armazenamento:** Tanques de combustível
- **Autonomia:** Enquanto houver Combustível

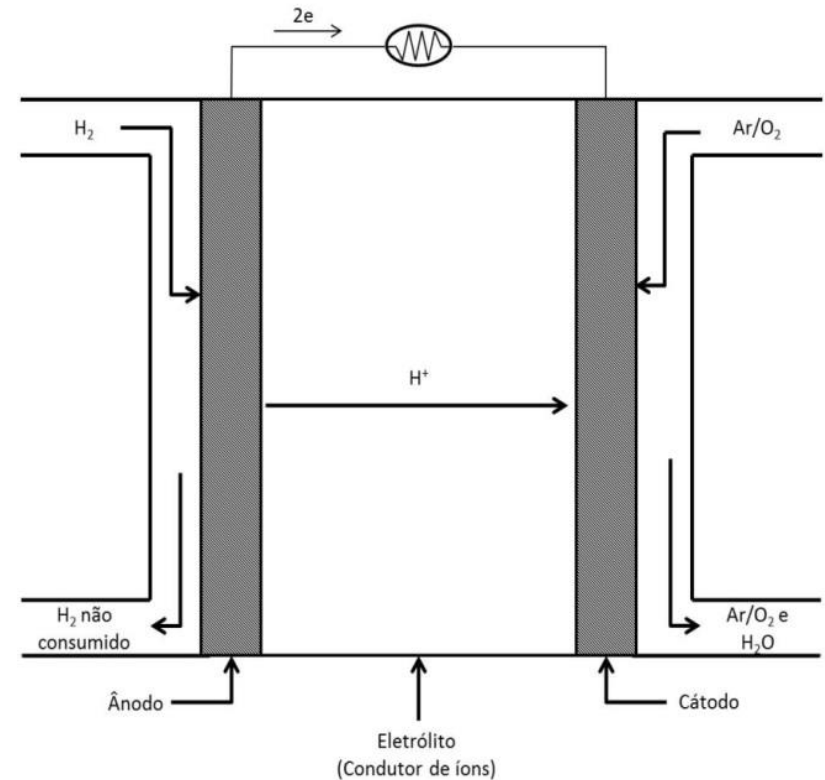


Figura 4: Típica Célula a Combustível [Adaptado de (BREEZE, 2005)]

SISTEMA DE COGERAÇÃO PROPOSTO

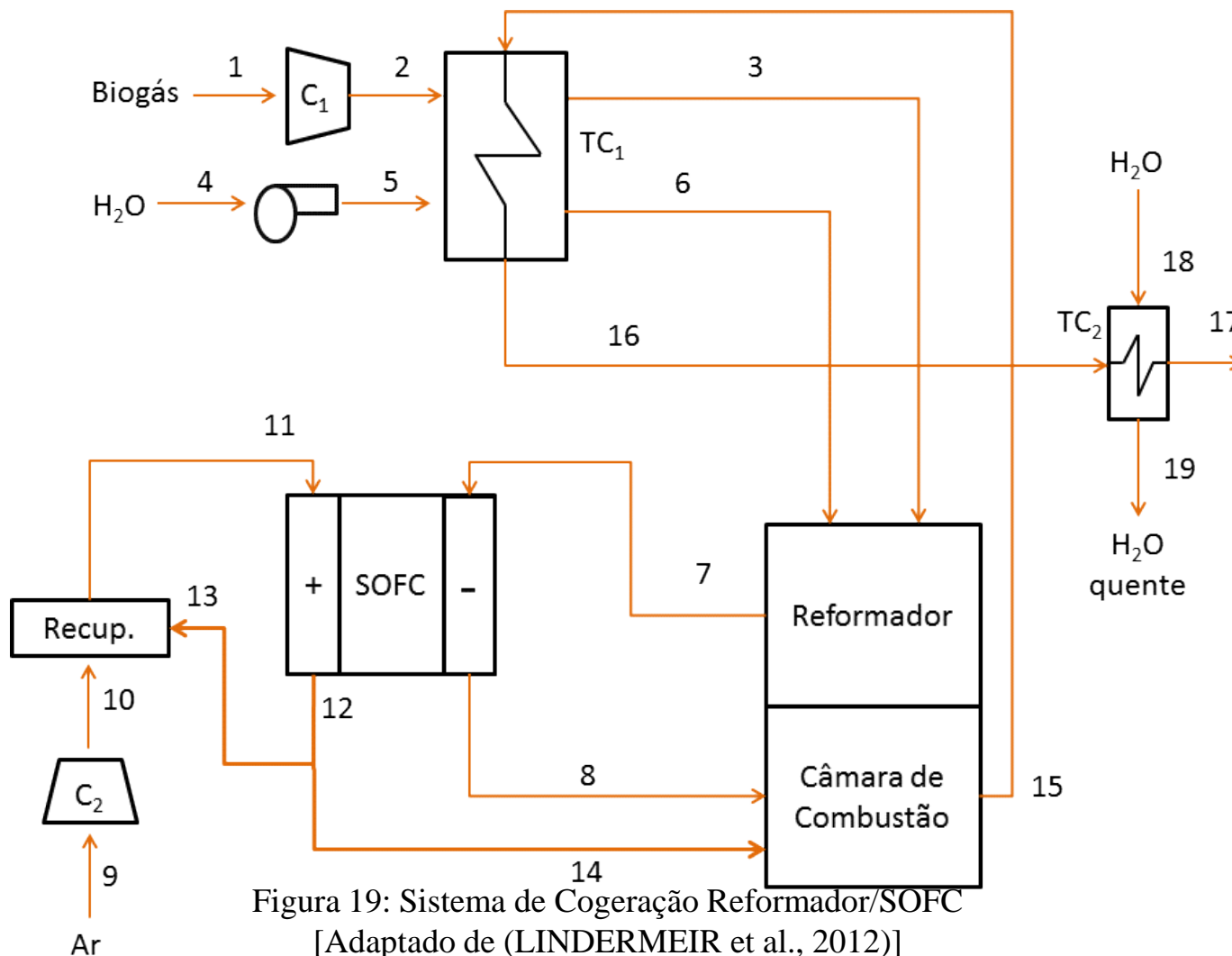


Figura 19: Sistema de Cogeração Reformador/SOFC
[Adaptado de (LINDERMEIR et al., 2012)]

SISTEMA DE COGERAÇÃO PROPOSTO

Pontos	Substâncias	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	Vazão (kg/s)
1	Biogás	25	101,3	2,84E-04
2	Biogás	74	131,7	2,84E-04
3	Biogás	640	131,7	2,84E-04
4	Água	25	101,3	3,83E-04
5	Água	29	131,7	3,83E-04
6	Vapor	100	131,7	3,83E-04
7	Hidrogênio, Gás Carbonico	640	101,3	6,67E-04
8	Hidrogênio, Gás Carbonico, Água	860	131,7	1,18E-03
9	Ar _{atm}	25	131,7	2,64E-03
10	Ar _{atm}	51	131,7	2,64E-03
11	Ar _{rec} +Ar _{atm}	560	101,3	6,59E-03
12	Ar _{SOFC}	860	131,7	6,08E-03
13	Ar _{rec}	860	131,7	3,95E-03
14	Ar _{SOFC} -Ar _{rec}	860	131,7	2,13E-03
15	Gases de Exaustão	800	101,3	3,30E-03
16	Gases de Exaustão	400	131,7	3,30E-03
17	Gases de Exaustão	50	131,7	3,30E-03
18	Água Ambiente	25	131,7	8,72E-03
19	Água Quente	60	101,3	8,72E-03

Tabela 7: Substâncias,
Temperaturas, Pressões e
Vazões do Sistema Proposto

SISTEMA DE COGERAÇÃO PROPOSTO

Parâmetros do Sistema de Cogeração

- Excesso de ar de 200% ($\lambda=3$)
- Taxa de Recuperação de Ar: 0,6.
- Temperatura da mistura de ar: 560°C.
- Temperatura Adiabática na Câmara de Combustão: 950°C
- $\eta_{comp1} = \eta_{comp2} = \eta_{bomba} = 0,9$

Escolha da Célula a Combustível de Óxido Sólido

Tabela 8: Modelos de Células a Combustível de Óxido Sólido disponíveis Comercialmente

Fabricante	Modelos	Potência Nominal (kW)	Principais Insumos
Bloom Energy	ES-5400	100	Gás Natural; Biogás
	ES-5700	200	
	UPM-570	160	
Ceramic Fuel Cells	BlueGen	2,0	Hidrogênio; Gás Natural
	Gennex	1,5	
	Mk200	0,65 - 0,85	
Sunfire Staxera			Hidrogênio; Combustíveis Reformados
	ISM	1,3 - 5,0	

Tabela 9: Características da célula Sunfire/Staxera (SUNFIRE, 2015)

Potência de Saída	4 kW
Número de Células	150
Temperatura Máxima	860°C
Força Eletromotriz de uma única célula (V_c)	0,65 V
Fator de Utilização do Combustível (μ_f)	75%

Cálculo da Força Eletromotriz de uma Célula a Combustível de Óxido Sólido

A variação das entalpias de formação e a variação das entropias para a reação da formação da água são dadas por:

$$\Delta \bar{h}_f = (\bar{h}_f)_{H_2O} - (\bar{h}_f)_{H_2} - \frac{1}{2} (\bar{h}_f)_{O_2} \quad \Delta \bar{s} = (\bar{s})_{H_2O} - (\bar{s})_{H_2} - \frac{1}{2} (\bar{s})_{O_2}$$

A entalpia e a entropia variam com a temperatura de acordo com a seguinte relação (BALMER, 1990):

$$\bar{h}_T = \bar{h}_{298,15} + \int_{298,15}^T \bar{c}_p dT \quad \bar{s}_T = \bar{s}_{298,15} + \int_{298,15}^T \frac{1}{T} \bar{c}_p dT$$

Parâmetros importantes em uma Célula a Combustível:

A variação da Energia Livre de Gibbs pode ser calculada através das entalpias de formação e das entropias a uma temperatura específica

$$\Delta \bar{g}_f = \Delta \bar{h}_f - T \Delta \bar{s}$$

Força eletromotriz

$$FEM = \frac{-\Delta G}{nF}$$

Eficiência Eletroquímica:

$$\eta_{elq} = \frac{\varepsilon_{real}}{\varepsilon_{max}}$$

Eficiência Termodinâmica:

$$\eta_{th} = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

Eficiência Prática:

$$\eta_{prt} = \frac{W_{el}}{\Delta H}$$

Análise Técnica da Célula a Combustível de Óxido Sólido

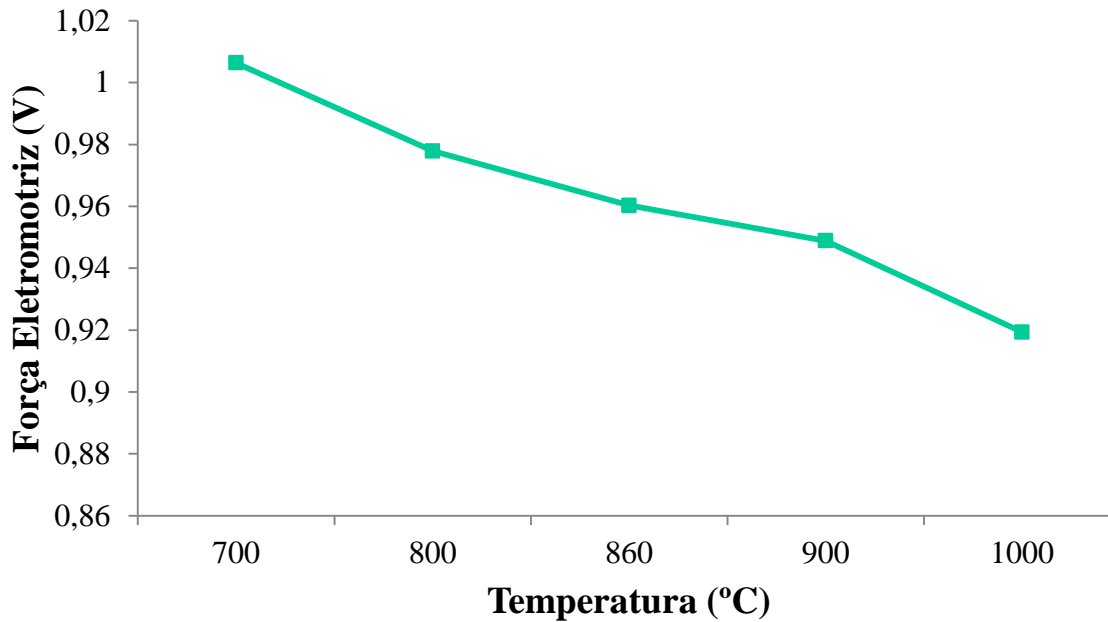


Figura 20: Comportamento da FEM em relação a temperatura de operação da célula a combustível de óxido sólido

Tabela 15: Resultados obtidos relevantes à Célula a Combustível de Óxido Sólido

T	FEM	i	\dot{W}_{SOFC}	\dot{W}_{aux}	ΔH	ΔS	ΔG	η_{th}	η_{elq}	η_{prt}	η_I	η_{II}
(°C)	(V)	(A)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW/K)	(kW)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
860	97,5	41,0	4	0,11	-10,6	-0,0024	-7,9	74,5	67,7	50,5	43,9	45,7

Análise Energética

Balanco de energia

$$\sum \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s = 0$$

Tabela 16: Balanço Energético dos Componentes do Sistema

Componentes	Entrada (W)	Saída (W)	Perdas (W)	Perdas (%)
Compressor 1	8.541	8.536	5	0,1
Compressor 2	864	857	8	0,1
Bomba	54	47	7	0,1
TC 1	11.683	11.354	328	3,9%
TC 2	2.465	2.190	276	3,2%
Reformador/CC	14.095	13.464	631	7,4%
Célula a Combustível	14.098	12.150	1.948	22,9%
Recuperador	4.472	3.736	737	8,7%

Análise Exergética

Tabela 17: Entalpia, Entropia e Exergia dos Pontos do Sistema

Pontos	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg.K)	ex^{TD} (kJ/kg)	ex^Q (kJ/kg)	ex^{Total} (kJ/kg)
1	29.961	6,97	-	31.159	31.159
2	30.032	7,17	10	31.234	31.243
3	30.884	9,02	301	32.119	32.420
4	105	0,37	-	50	50
5	122	0,42	-	50	50
6	2.676	7,36	486	527	1.013
7	18.541	-	-	-	15.298
8	2.412	-	-	-	2.167
9	299	6,87	-	404	404
10	325	6,95	2	404	406
11	567	7,85	245	43	287
12	914	8,22	486	39	524
13	914	8,22	486	39	524
14	914	8,22	486	39	524
15	945	8,99	-	-	650
16	473	8,43	-	-	338
17	64	7,62	-	-	83
18	105	0,37	-	50	50
19	251	0,83	8	50	58

Exergia física :

$$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$$

Exergia química de combustíveis (KOTAS, 1995) :

$$e_{ch} = \phi \cdot PCI$$

$$\phi_{H_2} = 0,985 \quad \phi_{Biogás} = 1,04$$

Exergia dos gases de combustão:

$$ex_{g\ ex} = C_{p\ g\ ex}(T_i) \cdot [T_i - T_0 - T_0 \cdot \ln\left(\frac{T_i}{T_0}\right)] + R_{g\ ex} \cdot T_0 \cdot \ln\left(\frac{P_i}{P_0}\right) + x_{g\ ex} \cdot ex_{ch} + R \cdot T_0 \cdot x_{g\ ex}$$

Análise Exergética

Balanco de Exergia:

$$\dot{E}x^{\dot{W}}_e + \dot{E}x^{\dot{Q}}_e + \sum \dot{m}e_e = \dot{E}x^{\dot{W}}_s + \dot{E}x^{\dot{Q}}_s + \sum \dot{m}e_s + \dot{I}$$

$$\dot{E}x^{\dot{Q}} = \dot{Q} \left(\frac{T - T_0}{T} \right) \quad \dot{E}x^{\dot{W}} = \dot{W}$$

Tabela 18: Exergias de entrada e saída, Irreversibilidades e Eficiência Racional dos Componentes do Sistema

Componentes	$E_{x_{entra}}$ (W)	$E_{x_{sai}}$ (W)	I (W)	Ψ (%)
Compressor 1	8879	8855	24	99,7%
Compressor 2	1141	1071	70	93,9%
Bomba	25	22	4	84,9%
TC 1	11044	10719	325	97,1%
TC 2	1552	1478	74	95,2%
Reformador/CC	13269	12355	914	93,1%
Célula a Combustível	12102	9741	2361	80,5%
Recuperador	3145	1895	1250	60,3%

Maiores Irreversibilidades: Célula a Combustível e Recuperador de Ar

Cálculo da Eficiências do Sistema de acordo com a 1ª Lei da Termodinâmica

Calor e Trabalho no Sistema:

$$\dot{W}_{\text{útil}} = \dot{W}_{SOFC} - (\dot{W}_{Comp1} + \dot{W}_{Comp2} + \dot{W}_{Bomba})$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{água}} (h_{\text{água quente}} - h_{\text{água fria}})$$

$$\eta_{Iel} = \frac{\dot{W}_{\text{útil}}}{\dot{m}_{\text{biogás}} PCI_{\text{biogás}}} \qquad \eta_{Iterm} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{\text{biogás}} PCI_{\text{biogás}}}$$

$$\eta_{Iglobal} = \frac{\dot{W}_{\text{útil}} + \dot{Q}}{\dot{m}_{\text{biogás}} PCI_{\text{biogás}}} = \eta_{Iel} + \eta_{Iterm}$$

Biogás (% massa): 60% CH₄ / 40% CO₂

$$PCI_{\text{biogás}} = PCI_{\text{metano}} \cdot \%CH_4$$

$$PCI_{\text{biogás}} \cong 30.000 \text{ kJ/kg}$$

Análise Econômica

Custos de produção dos recursos pelo sistema segundo a Metodologia de Tuna, (1999)

Custo energético para produção de Eletricidade pelo Sistema:

$$C_{EL} = \frac{\varphi \cdot f \cdot Inv_{Sist}}{H \cdot E_p} + \frac{C_{Biogás} \cdot (\dot{m}_{Biogás} \cdot PCI_{Biogás} - \dot{m}_{14} \cdot h_{14}) + (\dot{W}_{comp} + \dot{W}_{bomba}) \cdot T_{EL}}{E_p}$$

Custo energético para produção de Água Quente pelo Sistema:

$$C_{AQ} = \frac{\varphi \cdot f \cdot Inv_{TC}}{H \cdot \dot{m}_{17} \cdot h_{17}} + \frac{C_{Biogás} \cdot \dot{m}_{14} \cdot h_{14}}{\dot{m}_{17} \cdot h_{17}}$$

Análise Econômica

Custos de investimento:

- O preço FOB (*Free on Board*) ou Franco a Bordo é o preço que inclui as despesas de transporte da fábrica onde é produzida até o local de embarque para o Brasil, ou seja, situação em que o comprador viajaria até o país de fabricação para retirar o produto.
- O preço CIF (*Cost, Insurance and Freight*) ou Custo, Seguro e Frete; é o preço que também incorpora o valor do seguro e frete da mercadoria.

Tabela 13: Valor do investimento: Preço FOB e Preço CIF

Preço FOB _{Sistema} (US\$/kW)	1000	1500	2000	2500
Preço CIF _{Sistema} (US\$/kW)	2000	3000	4000	5000

- O custo de investimento no Trocador de Calor variou em 80, 120, 160 e 200 US\$/kW trocado.

Análise Econômica

Parâmetros da Análise Econômica

- Fator de Manutenção do sistema (φ) : **6%** do capital investido.
- O Fator de amortização do capital investido (k) variou em **2, 4, 6, 8, 10 e 12 anos**.
- A Taxa de juros foi fixada em **8%**.
- Foi utilizado o Fator de Conversão Monetário (f_{CM}) para o mês de março de 2015 de **3,08 (R\$/US\$)** (BCB, 2015)
- O Período de operação (H) foi de **5840 h/ano**, considerando 14 h de operação por dia e 365 dias por ano.
- O custo do biogás utilizado foi fixado em **0,0518 US\$/kWh**. (BRAGA et al., 2013)
- A Tarifa de referência (P_{EL}) para o mês de março de 2015 foi de **0,4958 R\$/kWh** (ANEEL, 2015)

Análise Econômica

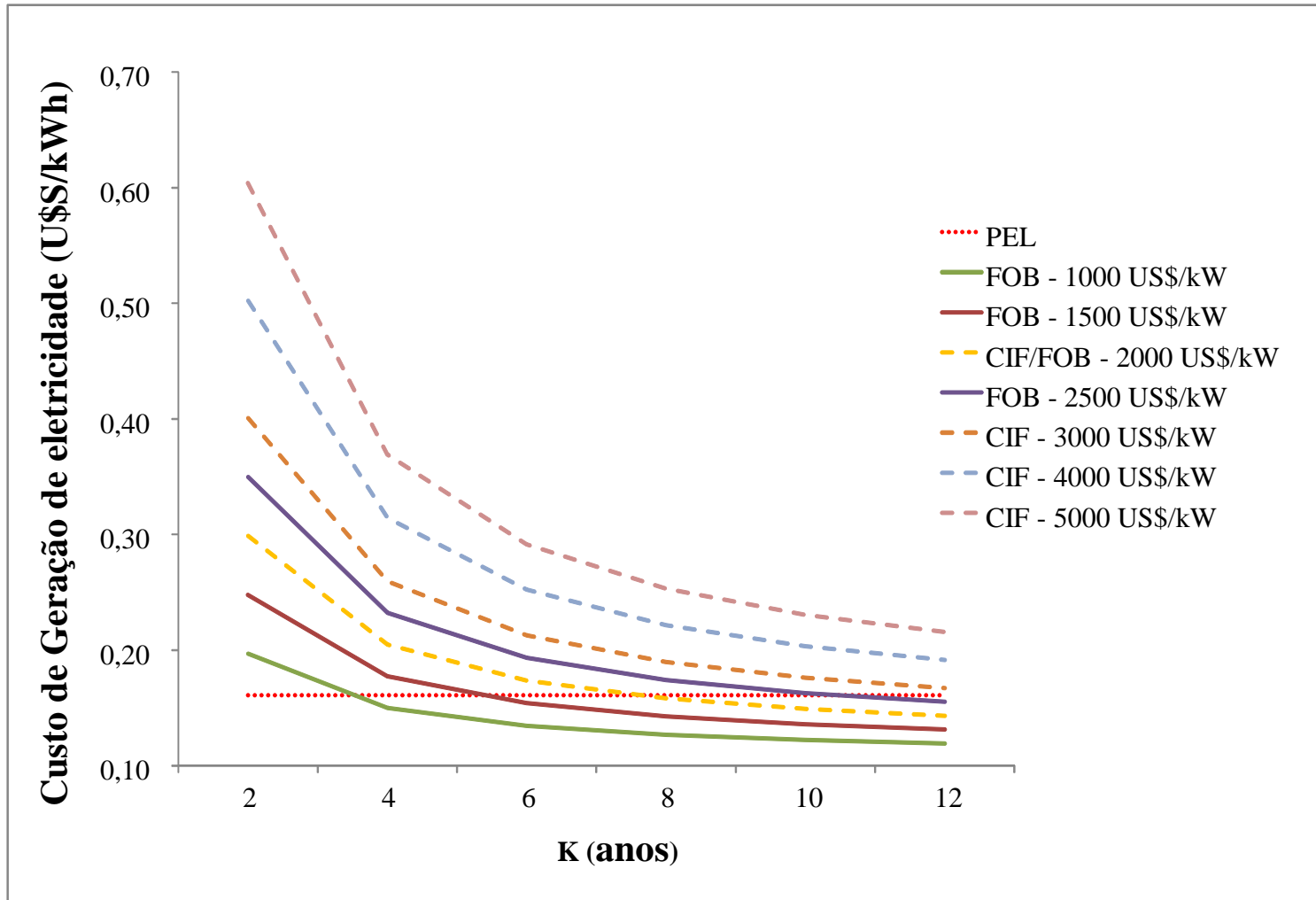


Figura 24: Gráfico Custo de Eletricidade vs Investimento no Sistema de Células a Combustível

Análise Econômica

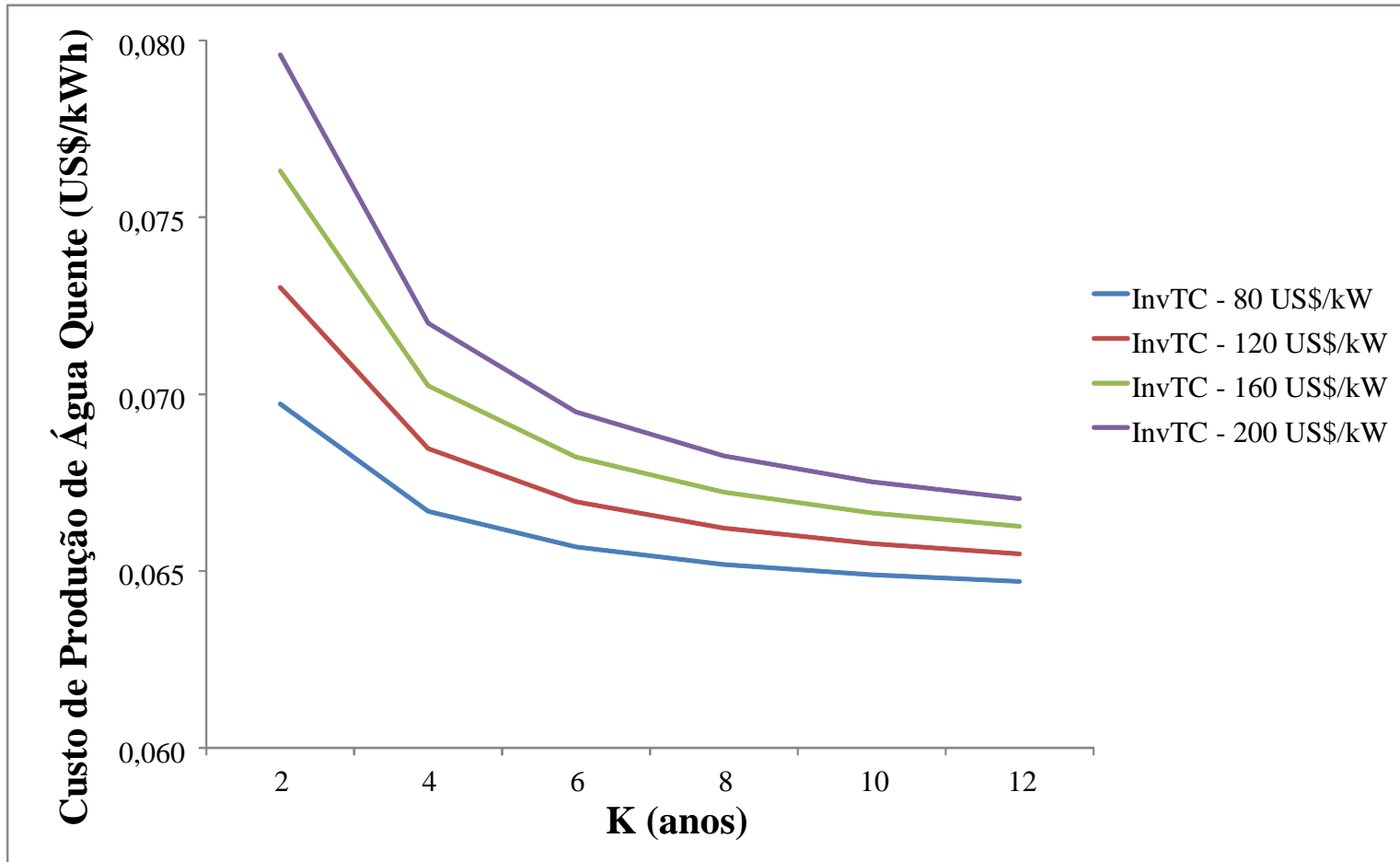


Figura 26: Receita Anual vs Investimento em Células a Combustível

Análise de emissão de poluentes

Metodologia de Cardu e Baica, (1999)

Dióxido de Carbono Equivalente ($CO_2)_e$ é uma medida utilizada para comparar as emissões de vários Gases de Efeito Estufa baseado no potencial de aquecimento global.

$$(CO_2)_e = CO_2 + 21(CH_4) + 80(SO_2) + 50(NO_X) + 67(MP)$$

O **Indicador de Poluição** quantifica o impacto ambiental dos combustíveis em relação ao seu potencial energético

$$\pi_g = \frac{(CO_2)_e}{PCI}$$

A **Eficiência Ecológica** calcula o impacto ambiental dos processos termoquímicos mediante a emissões equivalente de CO_2 produzidos pelo sistema

$$\varepsilon = \left[\frac{0,204 \times \eta_{I\ Global} \times \ln(135 - \pi_g)}{\eta_{I\ Global} + \pi_g} \right]^{0,5}$$

Análise de emissão de poluentes

A quantificação das emissões de poluentes foi realizada unicamente no reformador de biogás, pois não foram consumidos ou produzidos poluentes em outros processos do sistema proposto.

A Reforma do biogás ocorreu a partir de um conjunto de reações no intuito de maximizar a produção de hidrogênio

Tabela 21: Reações de Reforma do Biogás

Reforma Seca	$\frac{1}{4}CH_4 + \frac{1}{4}CO_2 \rightarrow \frac{1}{2}CO + \frac{1}{2}H_2$
Reforma a Vapor	$\frac{3}{4}CH_4 + \frac{3}{4}H_2O_{vapor} \rightarrow \frac{3}{4}CO + \frac{9}{4}H_2$
Reforma Shift	$\frac{5}{4}CO + \frac{5}{4}H_2O \rightarrow \frac{5}{4}CO_2 + \frac{5}{4}H_2$
Reação Global	$CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2$

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Tabela 22: Resultados de emissões de $(CO_2)_e$, indicador de poluição (π_g) e eficiência ecológica (ε) no Sistema proposto:

$(CO_2)_e$	(kg_{CO_2}/kg_{biogas})	1,846
π_g	(kg/MJ)	0,062
ε	$(\%)$	95,3

CONCLUSÕES

- A célula a combustível de óxido sólido vem ganhando mercado a nível residencial, seguindo o que ocorreu no setor comercial e industrial; com o aumento no volume de produção destes dispositivos há uma tendência de queda no investimento de capital.
- O sistema reformador/célula a combustível-SOFC mostra se uma opção bastante interessante, já que através do aproveitamento do calor gerado pela célula consegue reformar combustíveis com alto teor de carbono.
- A eficiência elétrica da célula a combustível comercial selecionada se situou bem próxima da eficiência prática de 50,5% (Considera somente H₂) para uma temperatura de operação 860° C.

CONCLUSÕES

- Ao efetuar a análise pela 1ª Lei da Termodinâmica obteve-se uma eficiência elétrica de 45,7% e eficiência térmica de 15,0%, resultando em uma eficiência global de 60,7% .
- A eficiência térmica foi calculada a partir da energia útil (água quente) produzida no sistema, mas a energia do combustível também foi utilizada para outros processos , entre os quais a reforma do biogás, o pré-aquecimento de ar e na geração de vapor.
- A aplicação da 2ª Lei da Termodinâmica (método exerético) mostrou que os dispositivos com maiores perdas foram a Célula a Combustível e o Recuperador de Ar, apresentando valores para eficiência racional de 80,5% e 60,3%, respectivamente.

CONCLUSÕES

- O sistema apresentou viabilidade para todas as faixas de preço FOB, sendo que no melhor cenário (1000 US\$/kW) consegue-se obter receita em **3,5** anos.
- Para o preço CIF, existe receita apenas no melhor cenário, que considerará 2000 US\$/ kW e um período de amortização de capital investido de 7 anos.
- A produção de água quente não apresentou viabilidade, pelo fato da quantidade produzida ser pequena e o seu custo de produção ficar bem acima do seu custo em sistema convencional.
- O sistema de cogeração indicou uma **Eficiência Ecológica de 95,3%**; este alto valor comprova que o sistema é pouco poluente e bastante interessante sobre o ponto de vista ambiental.



- Sugestões para trabalhos futuros:
 - Elaboração de novos ciclos e construções de Diagrama de Sankey e de Grassmann para o sistema proposto;
 - Otimização energética do sistema proposto, estudando alternativas mais eficientes para o aproveitamento de energia residual no processo.
 - Análise termoeconômica utilizando Programação Linear ou Não-Linear para a otimização de sistemas compactos como o apresentado;
 - Incorporação do custo do CO₂e na alocação dos custos de produção de eletricidade e calor na planta proposta.
 - Influência da variação do custo do biogás no estudo de viabilidade econômica.





**Laboratório de Otimização
de Sistemas Energéticos**



Obrigado!

joseluz@feg.unesp.br; celso.tuna@unesp.br
www.feg.unesp.br/ipben