



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

USO DE BIOGÁS DE ATERRAÇAMENTO 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

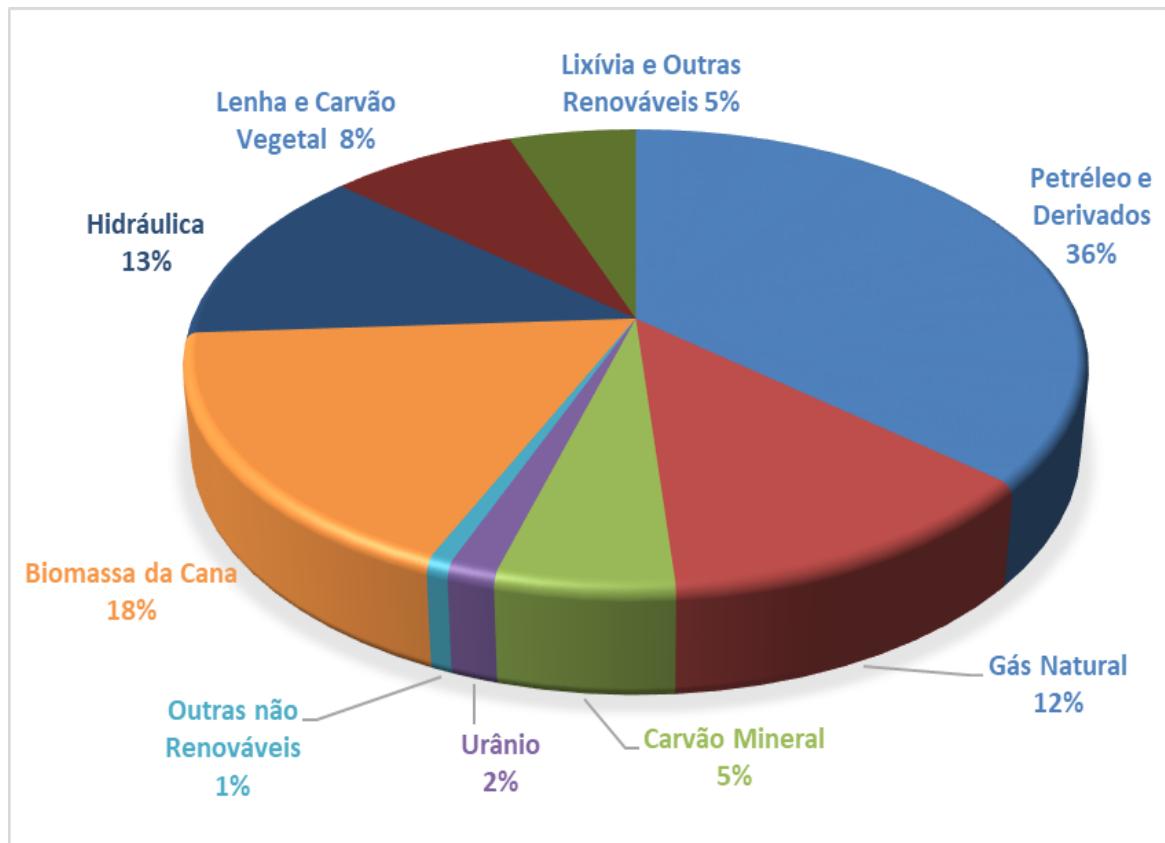


Figura 1: Matriz Energética Brasileira (MME (2017)



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 independe** de fatores sazonais.



ESTUDO DA OBTEÇÃO, 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).

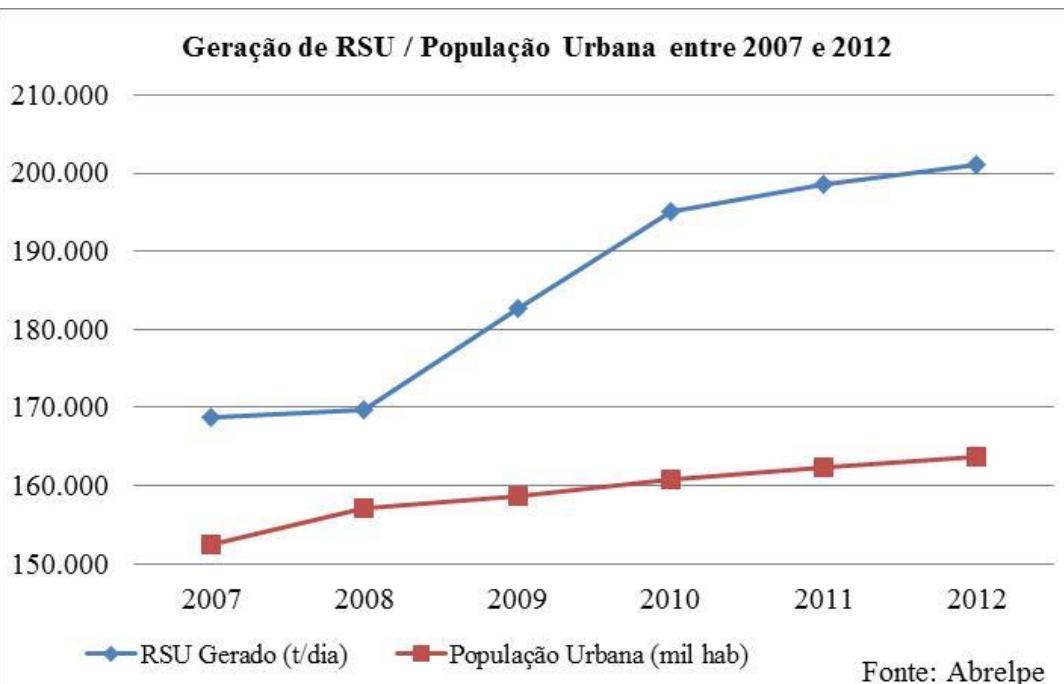


Tabela 2: Índice de Produção de RSU per Capita no Brasil (Abrelpe,2012)

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

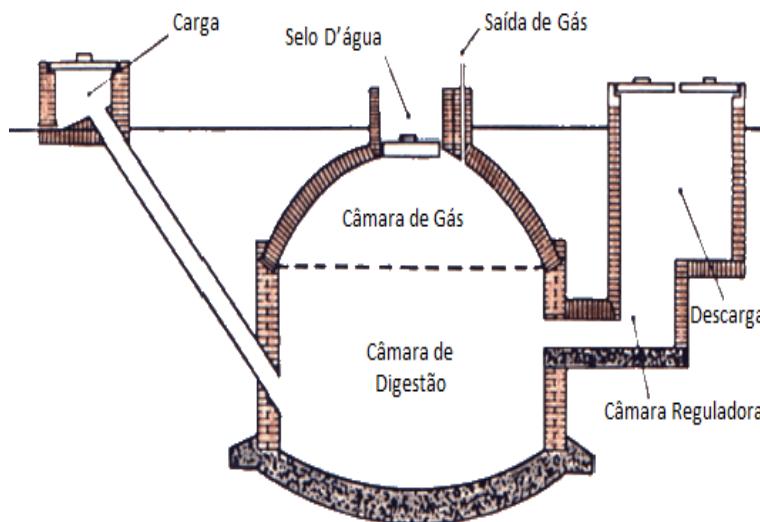


Figura 5: Biodigestor Modelo Chinês (EMAS, 2015)

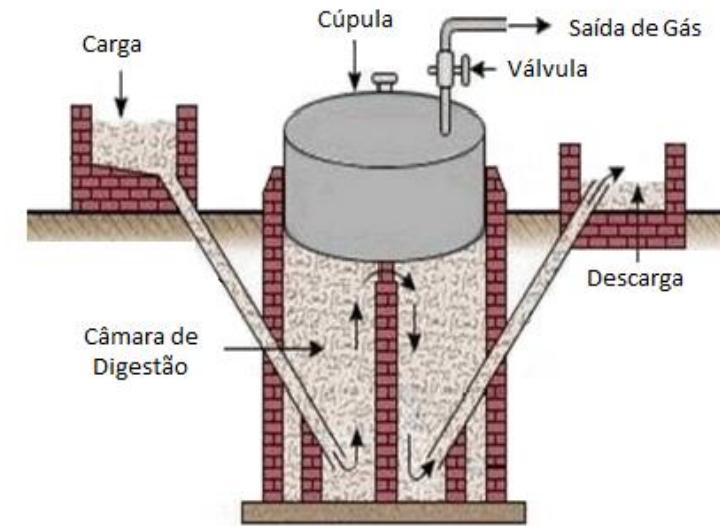


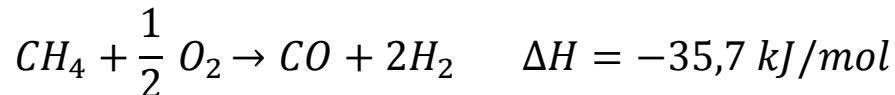
Figura 6: Biodigestor Modelo Indiano (EMBRAPA, 2015)

- Foco na Produção de Fertilizantes
- Sistema Simples e Barato
- Cúpula (Campana) Fixa
- Foco na Produção de Biogás
- Sistema mais Sofisticado
- Cúpula Móvel utilizada como gasômetro



ESTUDO DA OBTEÇÃO, REFORMA E USO DE BIOGÁS EM SOFC

Oxidação Parcial



Vantagem:

Reação exotérmica

Desvantagem:

Necessidade de O₂ puro, aumentando custos

Reforma seca ou com CO₂



Vantagem:

Aproveitamento do CO₂ presente no Biogás

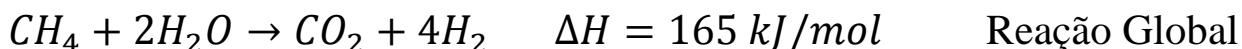
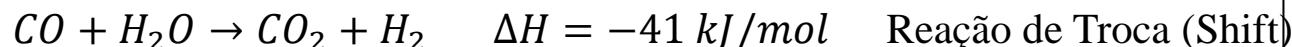
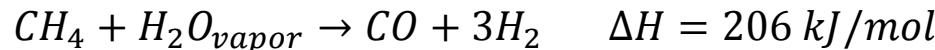
Desvantagem:

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

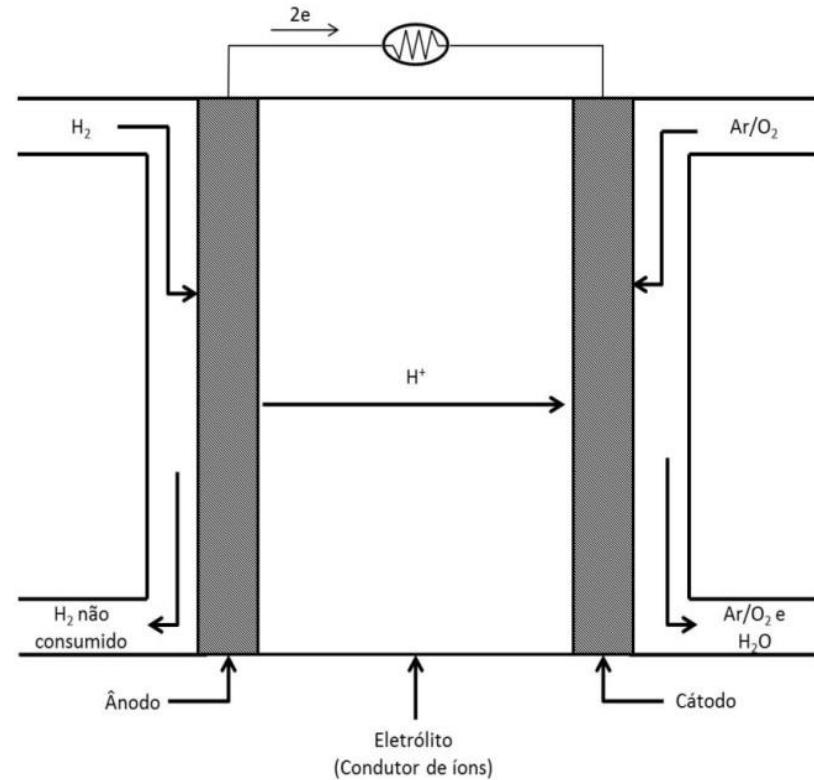


Figura 4:Típica Célula a Combustível [Adaptado de (BREEZE, 2005)]

SISTEMA DE COGERAÇÃO PROPOSTO

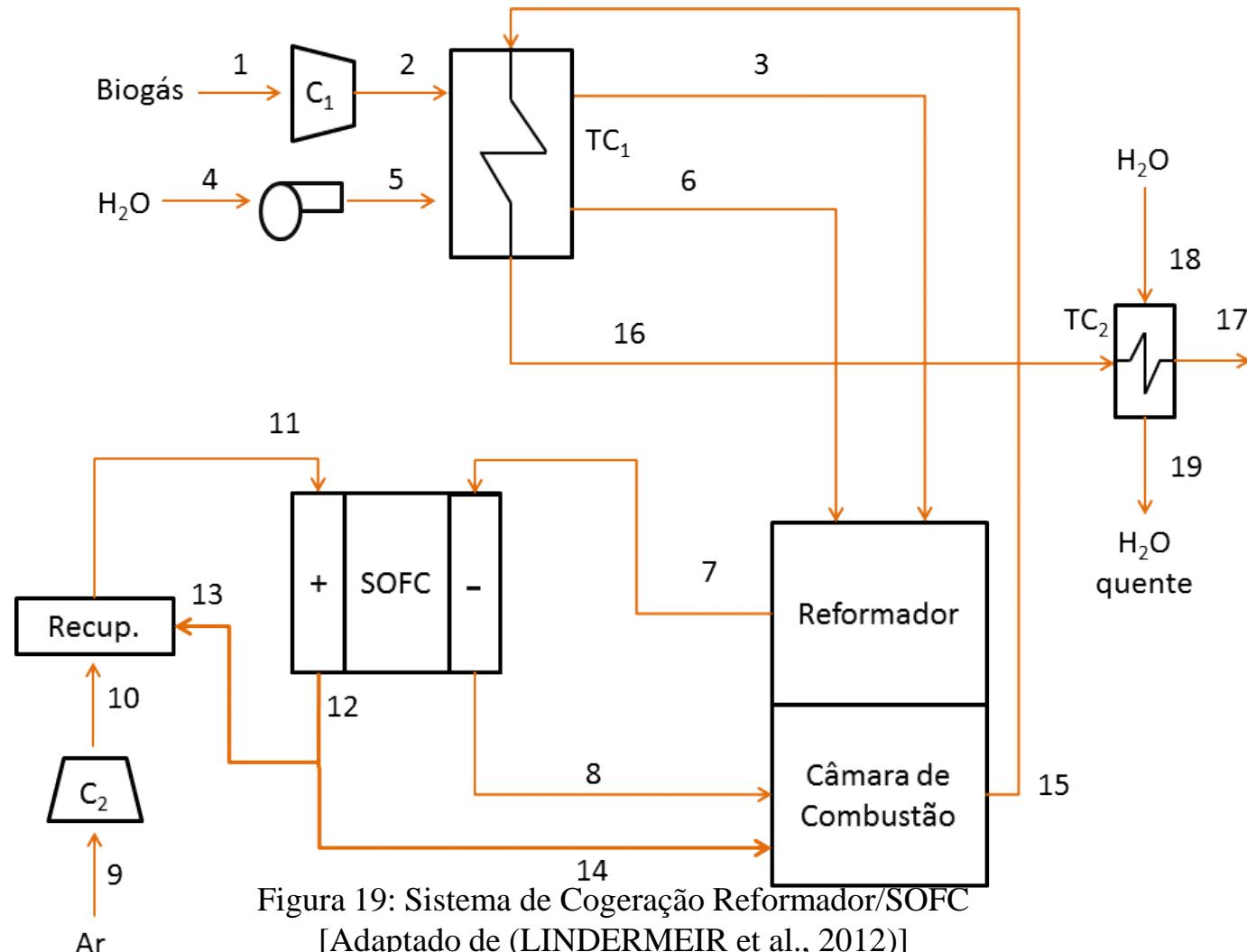


Figura 19: Sistema de Cogeração Reformador/SOFC
[Adaptado de (LINDERMEIR et al., 2012)]

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	Hidrogênio;
Sunfire Staxera	ISM	1,3 - 5,0	Combustíveis Reformados

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

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

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

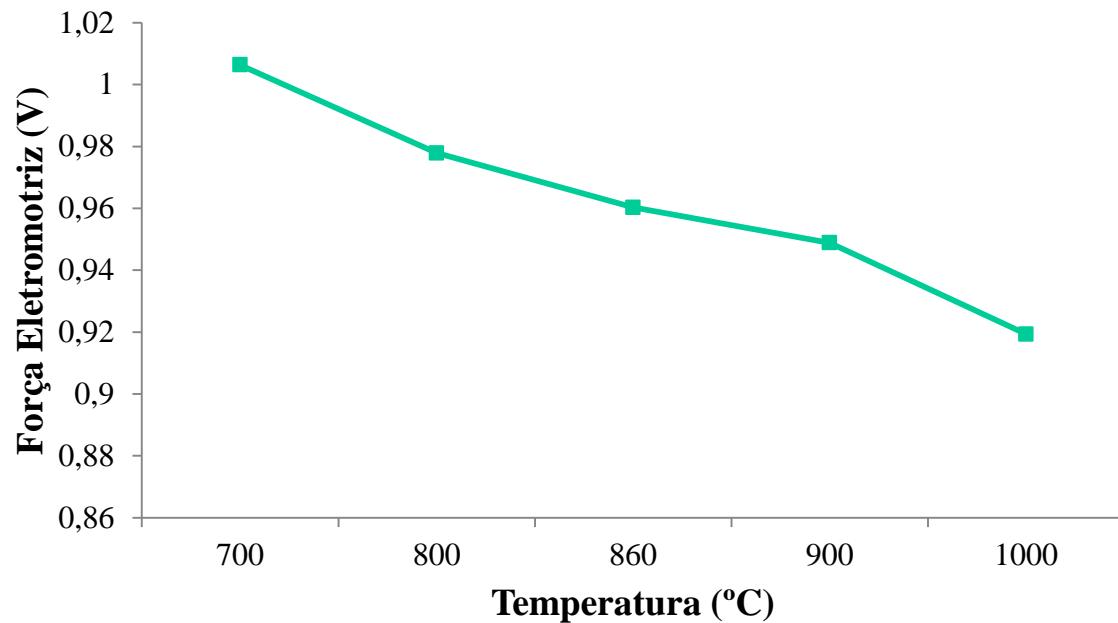


Figura 20: Comportamento da FEM em relação a temperatura de operação da célula a combustível de óxido sólido

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

T (°C)	FEM (V)	i (A)	\dot{W}_{SOFC} (kW)	\dot{W}_{aux} (kW)	ΔH (kW)	ΔS (kW/K)	ΔG (kW)	η_{th} (%)	η_{elq} (%)	η_{prt} (%)	η_I (%)	η_{II} (%)
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

Balanço 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:

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



Análise Exergética

Balanço de Exergia:

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

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

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

Componentes	Ex _{entra} (W)	Ex _{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 1^a Lei da Termodinâmica

Calor e Trabalho no Sistema:

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

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

$$\eta_{I\ el} = \frac{\dot{W}_{útil}}{\dot{m}_{biogás} PCI_{biogás}}$$

$$\eta_{I\ term} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{biogás} PCI_{biogás}}$$

$$\eta_{I\ global} = \frac{\dot{W}_{útil} + \dot{Q}}{\dot{m}_{biogás} PCI_{biogás}} = \eta_{I\ el} + \eta_{I\ term}$$

Biogás (% massa): 60% CH₄ / 40% CO₂

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

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



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

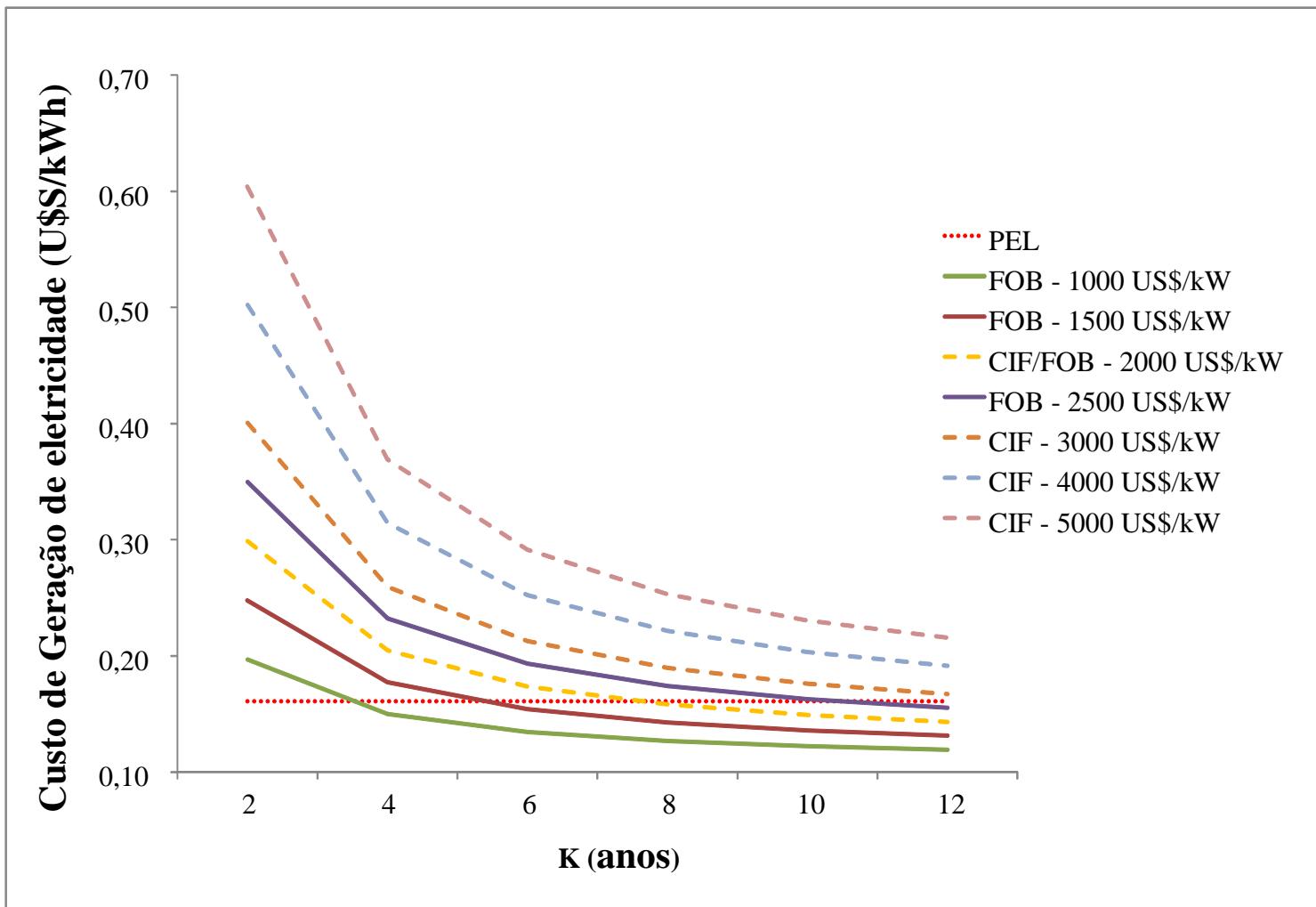


Figura 24: Gráfico Custo de Eletricidade vs Investimento no Sistema de Células a Combustível

Análise Econômica

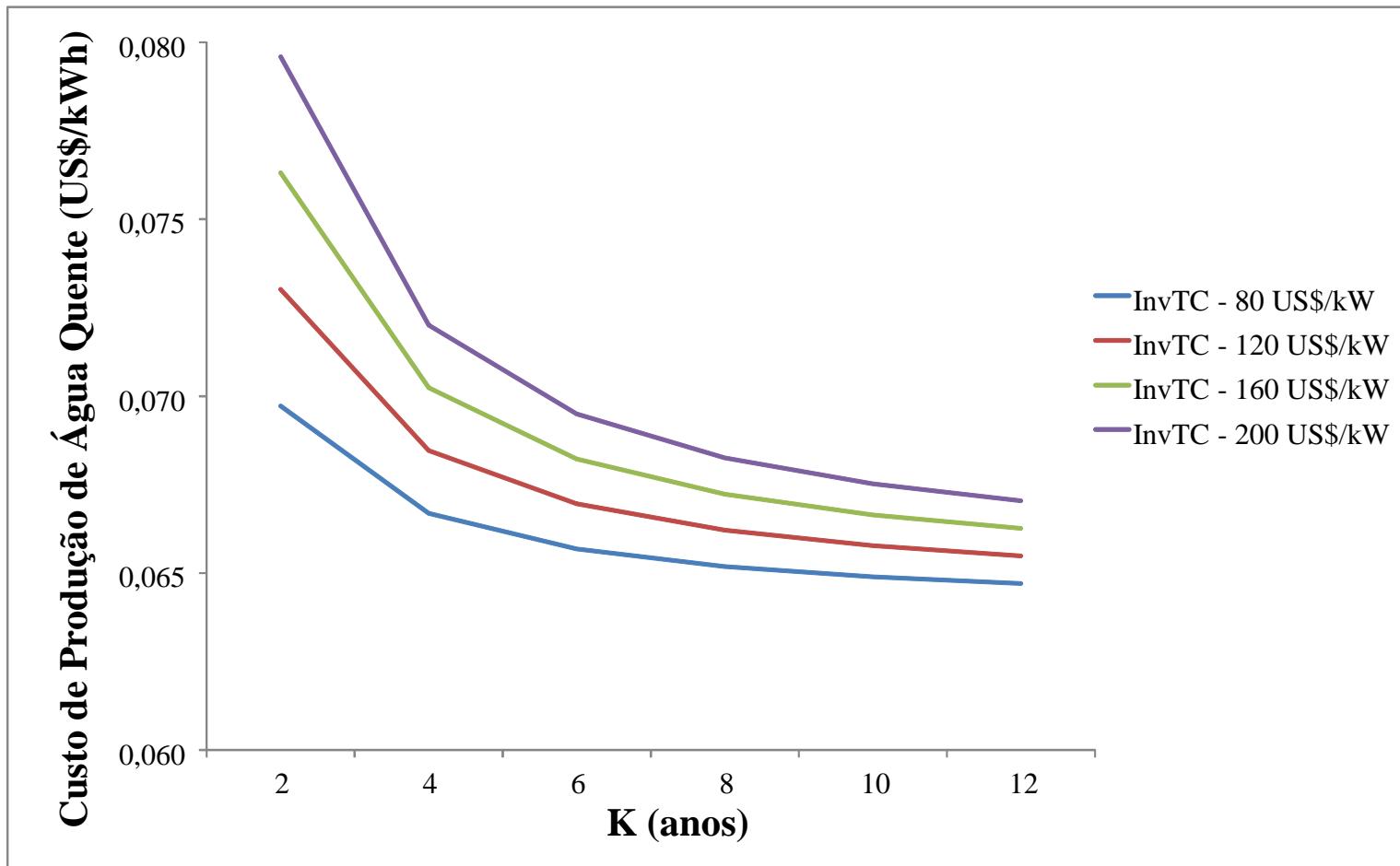


Figura 26: Receita Anual vs Investimento em Células a Combustível



Análise de emissão de poluentes

Metodologia de Cardu e Baica, (1999)

Dióxido de Carbono Equivalente (CO_2) 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 1^a 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 2^a Lei da Termodinâmica (método exergético) 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 considerá 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