

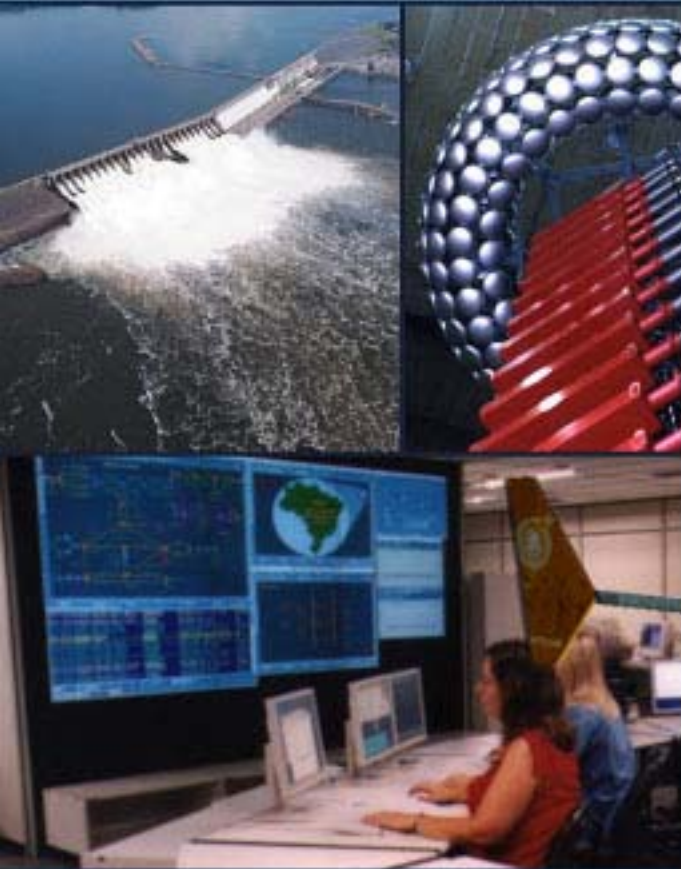


Grupo Eletrobrás



Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Grupo Eletrobrás



Células a Combustível: Fundamentos e Atividades do CEPEL

Eduardo T. Serra

DIRETORIA DE P&D

José Geraldo de M. Furtado

DEPTO. DE TECNOLOGIAS ESPECIAIS

- **Introdução**
- **Células a Combustível**
 - Aspectos Básicos
 - Aplicações
- **Inserção no Mercado**
 - Aspectos Críticos
 - Análise Técnico-econômica
- **Atividades do CEPEL**
 - Unidade de Demonstração (5kW)
 - Reforma de Etanol
 - Desenvolvimento de Componentes
 - Modelagem - Aproveitamento do rejeito térmico
 - Análise técnico-econômica
- **Conclusões**

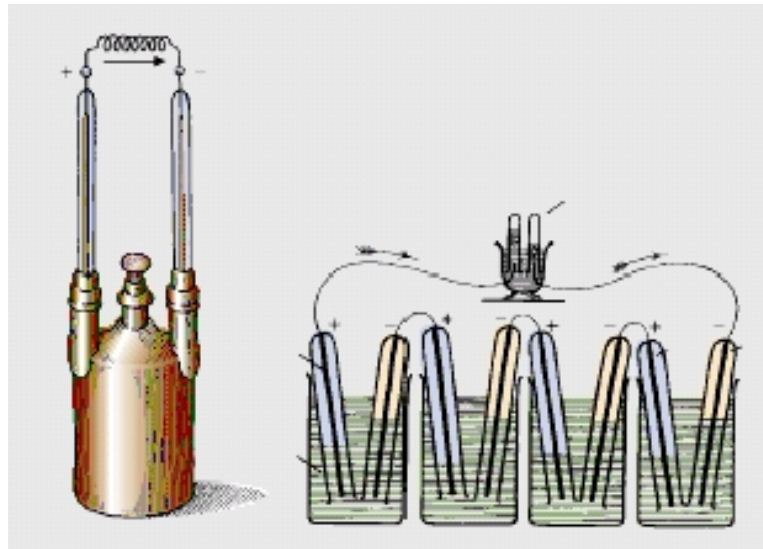


Unidade Ilha do Fundão



Unidade Adrianópolis

Originalmente concebidas em 1839 por William Grove, como o processo inverso da eletrólise da água;



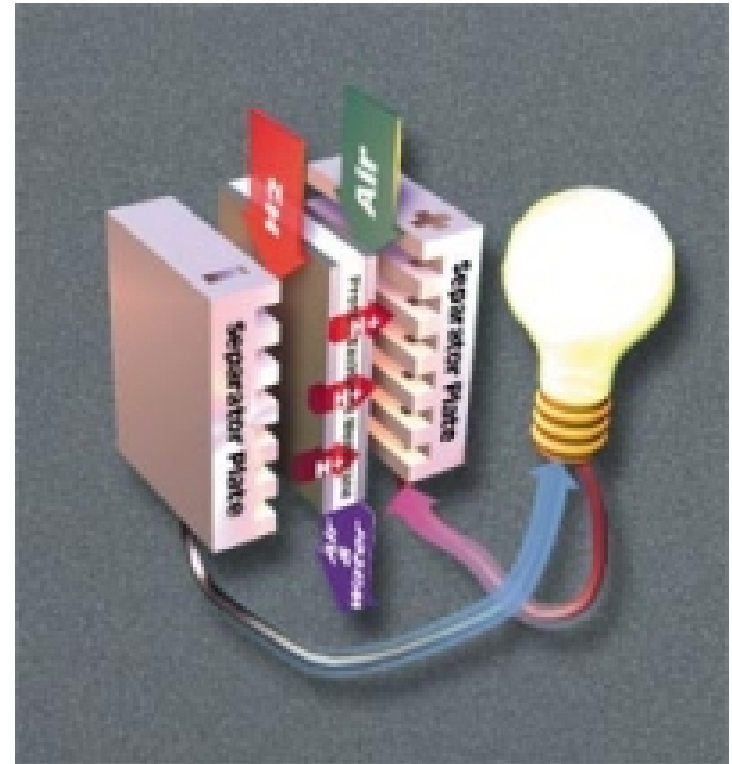
Grove's historic fuel cell (1839)

São dispositivos eletroquímicos que convertem a energia química de uma reação **diretamente** em energia elétrica.

Célula a Combustível

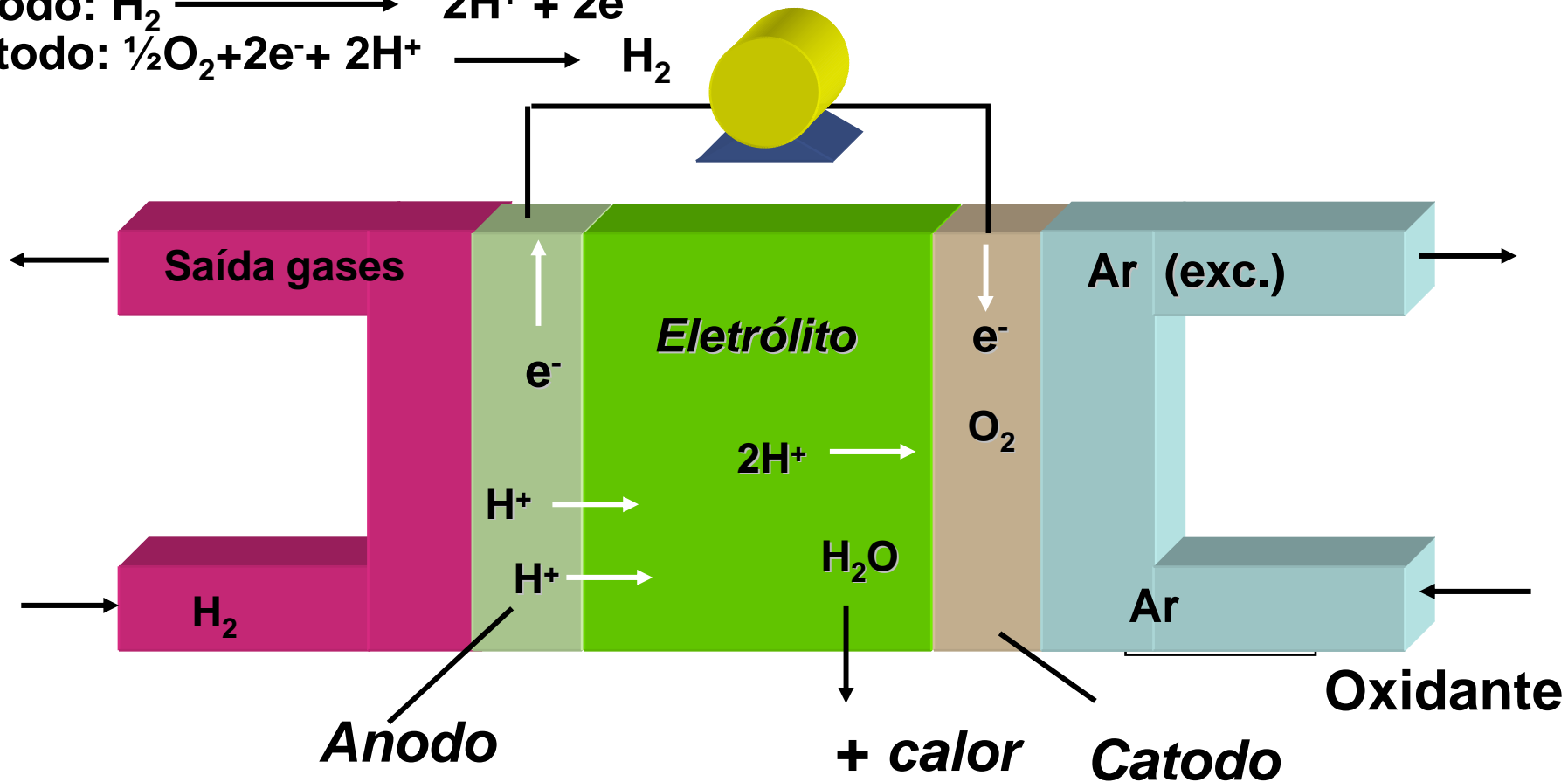
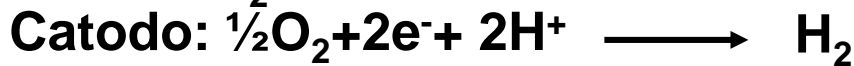
Aspectos Básicos

- Funciona como uma bateria continuamente alimentada;
- Transporte iônico ocorre através do conjunto eletrodo/eletrólito;
- Enquanto houver suprimento de combustível e oxidante (ar/O₂) – permanece operando;
- Converte hidrogênio e ar (ou O₂ puro) em água – reverso da eletrólise – e energia (elétrica e térmica).

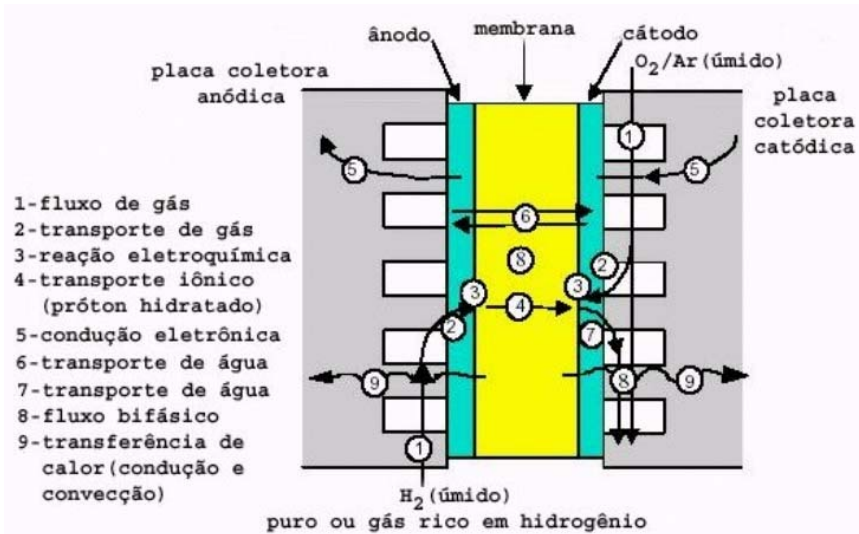


Célula a Combustível

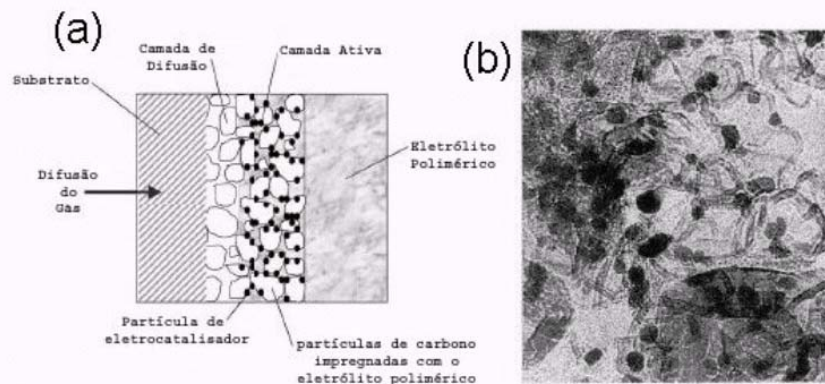
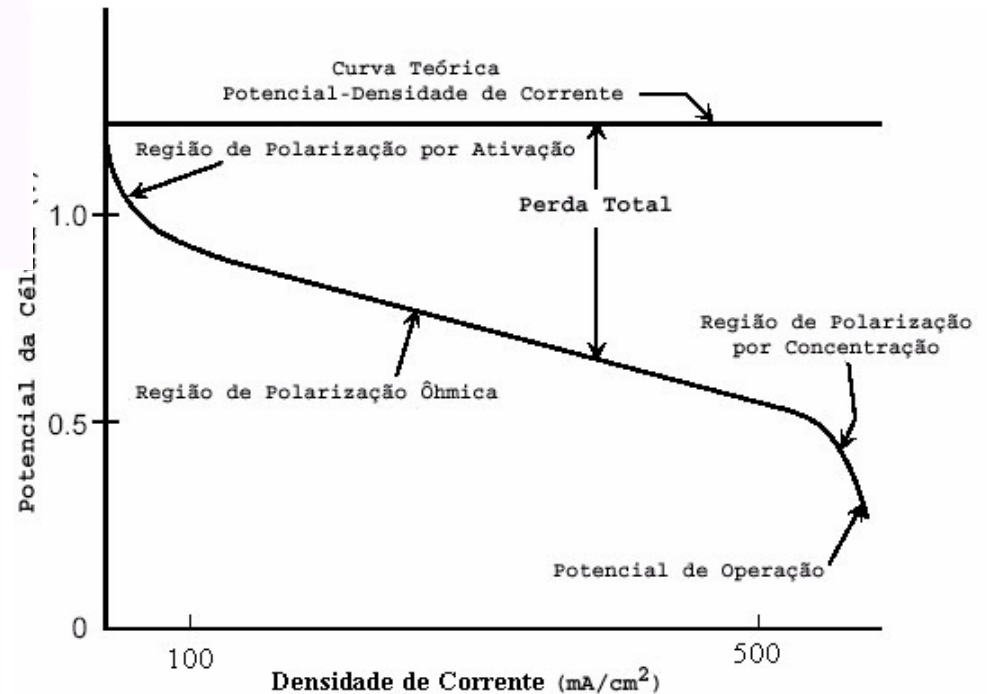
Aspectos Básicos



Célula a Combustível Aspectos Básicos

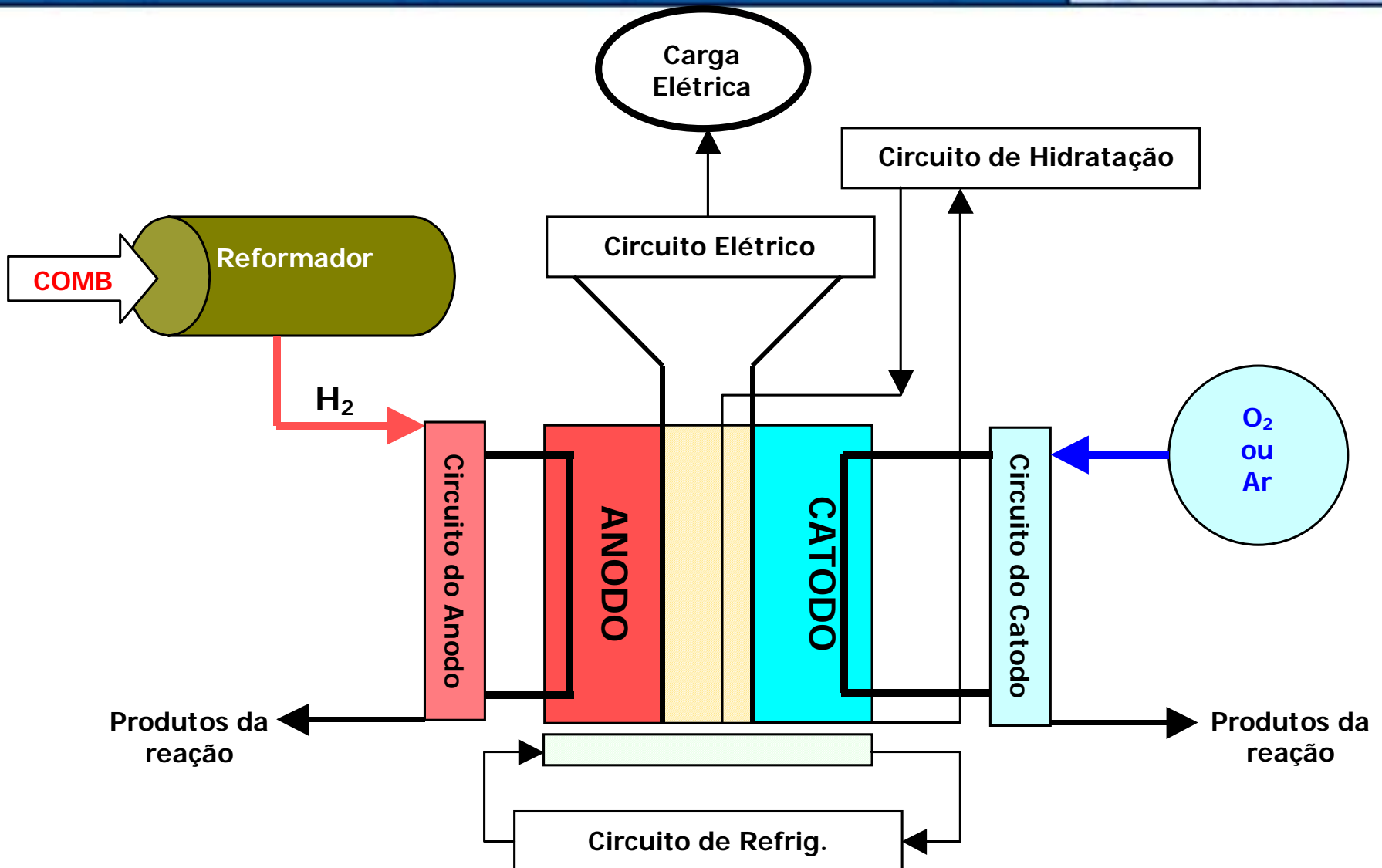


$$\eta_{\text{REAL}} = \frac{V_{\text{REAL}}}{V_{\text{IDEAL}}} = 1 - \frac{(\varphi_{\text{Ativ}} + \varphi_{\text{Ohm}} + \varphi_{\text{Conc}})}{1,229}$$



Célula a Combustível

Aspectos Básicos



Vantagens:

- Perspectiva de alta eficiência e confiabilidade;
- Excelente desempenho em cargas parciais;
- Ausência ou baixas emissões;
- Expectativa de intervalos elevados entre falhas;
- Silenciosas pela ausência de partes móveis;
- Modularidade e operação remota;
- Flexibilidade de utilização de combustíveis

Desvantagens:

- Vida útil limitada (vida útil real desconhecida);
- Eficiência elétrica decrescente ao longo da vida;
- Investimento inicial ainda muito elevado;
- Poucas unidades de demonstração;
- Poucos provedores da tecnologia;
- Tecnologia pouco divulgada para geração estacionária;

Alcalinas (AFC)
Ácido Fosfórico (PAFC)
Membrana Polimérica (PEMFC)

.....

Carbonato Fundido (MCFC)
Óxido Sólido (SOFC)

Baixa Temperatura

Alta Temperatura

Célula a Combustível

Aspectos Básicos

Célula Combustível (Tipo)	Eletrólito	Temperatura (°C)	Características	Combustível e Oxidante	Ion de Transp.	Reação Anódica e Reação Catódica
AFC (Alcalina)	Hidróxido de Potássio	50 - 120	Intolerante ao CO ₂ (< 50 ppm)	Comb.: H ₂ Oxidante: O ₂ + (H ₂ O)	OH ⁻	$H_2 + OH = H_2O + 2e$ $\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e = 2OH^-$
PAFC (Ácido Fosfórico)	Ácido Ortofosfórico	180 - 210	Moderadamente e tolerante ao CO (< 2 %)	Comb.: GN ou H ₂ Oxidante: Ar	H ⁺	$H_2 = 2H^+ + 2e$ $\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e = 2OH^-$
PEMFC (Membrana Polimérica)	Ácido Sulfônico em Polímero	60 - 110	Intolerante ao CO (< 10 ppm)	Comb.: GN, Metanol ou H ₂ Oxidante: Ar	H ⁺	$H_2 = 2H^+ + 2e$ $\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e = 2OH^-$
DMFC (Metanol Direta)	Ácido Sulfúrico ou Polimérico	45 - 100		Comb.: Metanol Oxidante: Ar	H ⁺	$CH_3OH + H_2O = CO_2 + H^+ + 6e$ $1 \frac{1}{2} O_2 + 6H^+ + 6e = 3H_2O$
MCFC (Carbonato Fundido)	Mistura de Carbonatos de Lítio e Potássio	630 - 650	Totalmente tolerante ao CO	Comb.: GN, Gás de Síntese Oxidante: Ar + CO ₂	CO ³⁻	$H_2 + CO_3^- = H_2O + CO_2 + 2e$ $\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e = CO_3^{2-}$
SOFC (Óxido Sólido)	Zircônia estabilizada com Ytria	900 - 1000	Totalmente tolerante ao CO	Comb.: GN, Gás de Síntese Oxidante: Ar	O ⁻	$H_2 + 2O^{2-} = 2H_2O + 4e$ $O_2 + 4e = 2O^{2-}$

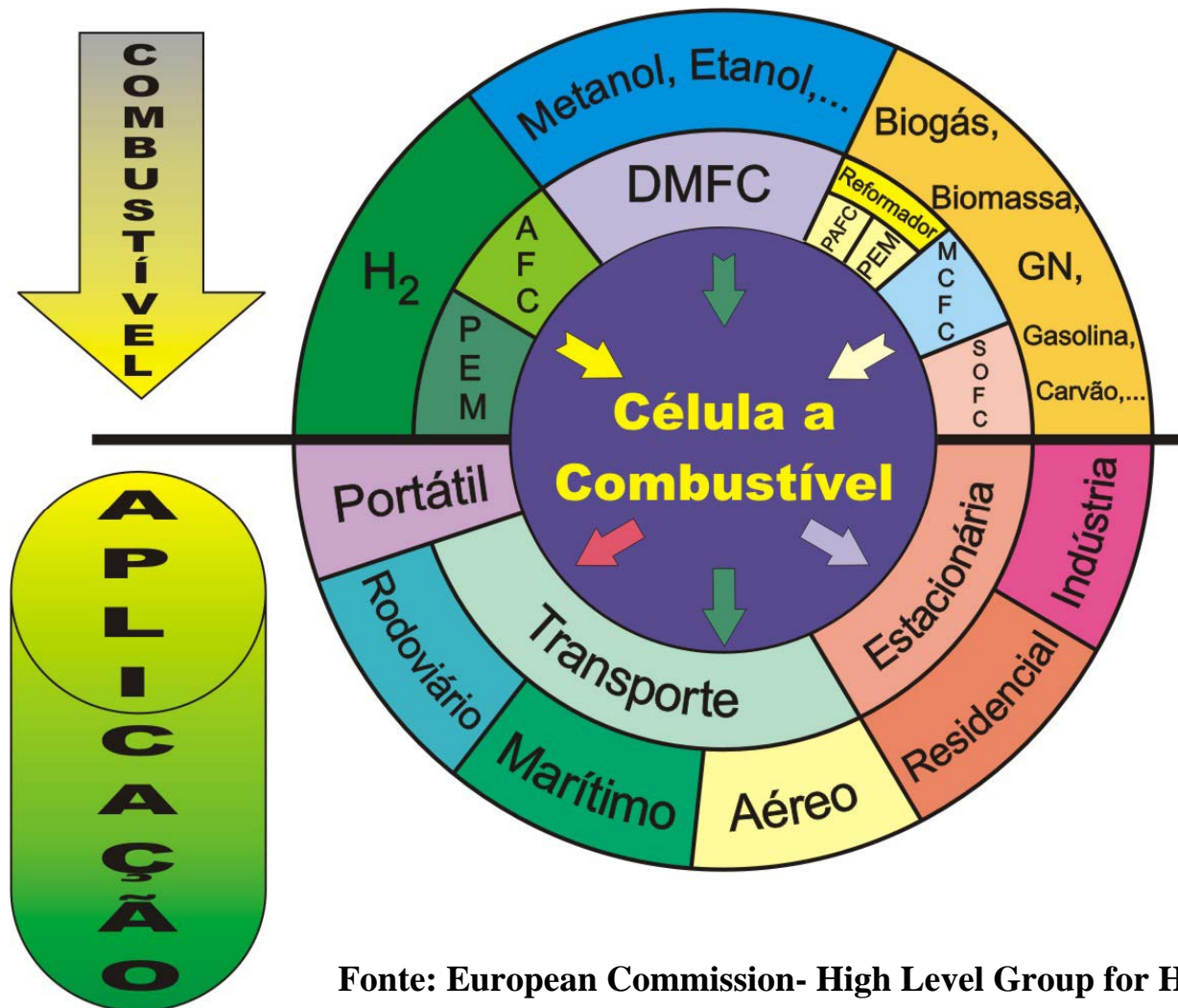
Célula a Combustível

Aplicações

Aplicações Típicas	Equipamentos Eletrônicos Portáteis			Geração Residencial		Veicular	Geração Distribuída		
Potência (Watts)	1	10	100	1K	10K	100K	1M	10M	
Principais Vantagens	Densidade de energia mais elevada que as baterias			Alta eficiência, Emissões nulas			Alta eficiência, Menos poluição,		
Faixa de Aplicação dos Diferentes Tipos de Células a Combustível	<p>The diagram illustrates the application ranges for various fuel cell types across the power spectrum. The ranges are represented by double-headed arrows:</p> <ul style="list-style-type: none"> AFC (blue): Residential generation (1K to 10K Watts). MCFC (cyan): Distributed generation (100K to 10M Watts). SOFC (green): Residential and distributed generation (10K to 10M Watts). PEMFC (yellow): Portable electronic equipment (1 to 100 Watts). DMFC (orange): Portable electronic equipment (1 to 100 Watts). PAFC (pink): Residential and distributed generation (10K to 100K Watts). 								

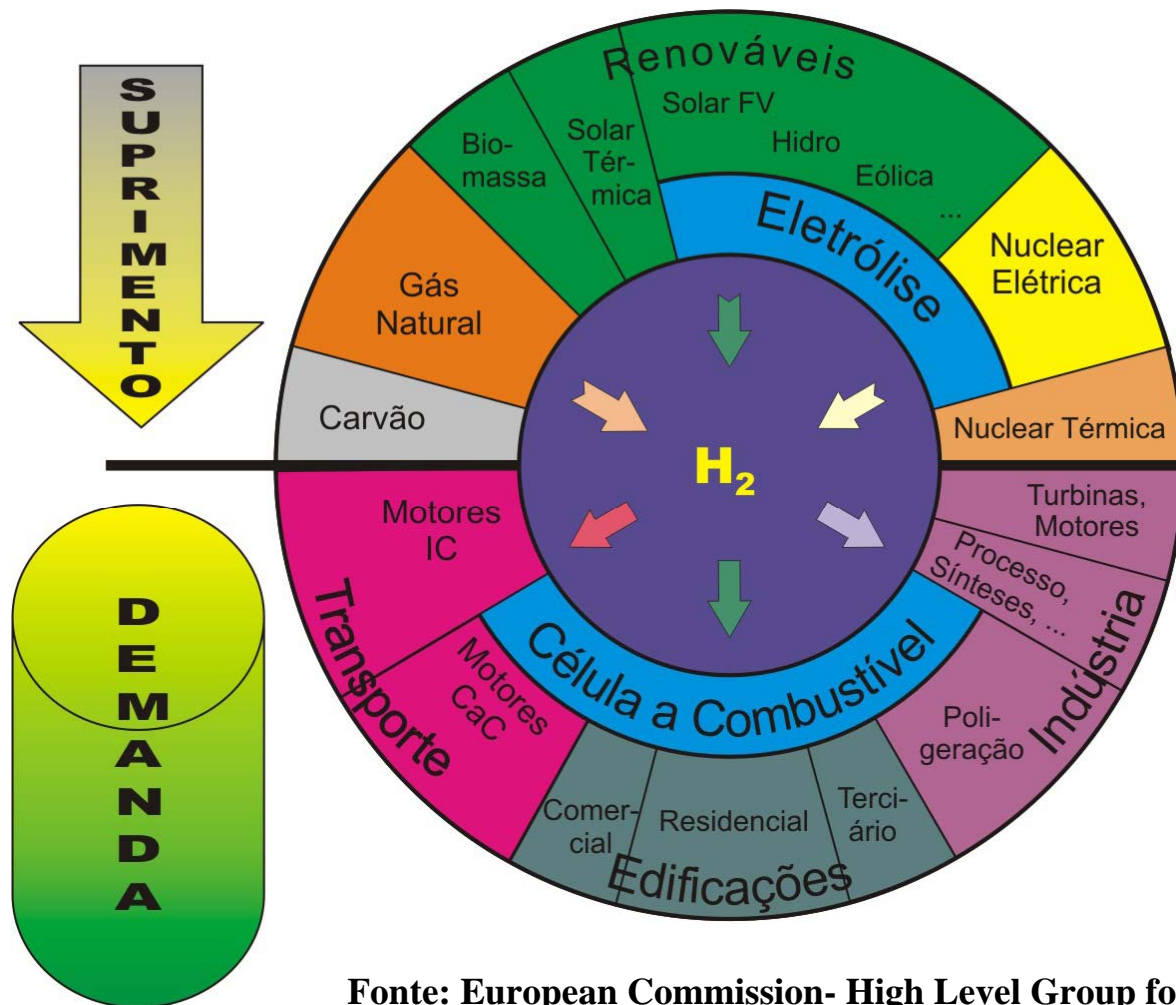
Célula a Combustível

Combustíveis e Aplicações



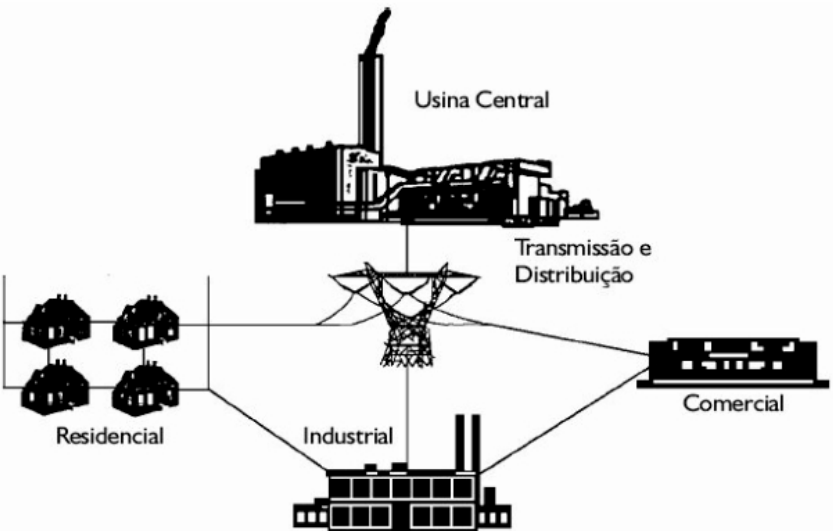
Fonte: European Commission- High Level Group for Hydrogen and Fuel Cells

Célula a Combustível Produção de Hidrogênio



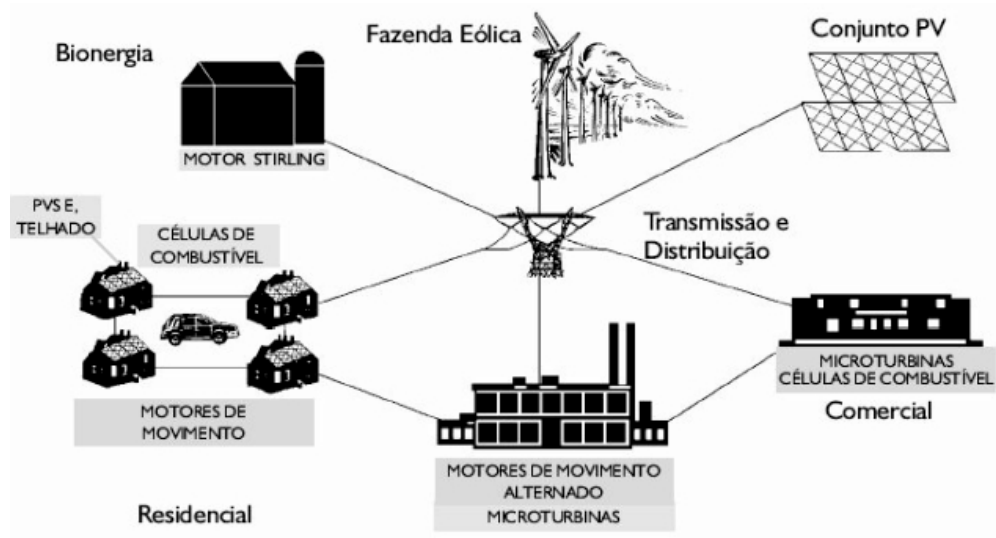
Fonte: European Commission- High Level Group for Hydrogen and Fuel Cells

Célula a Combustível Aplicações – Geração Estacionária

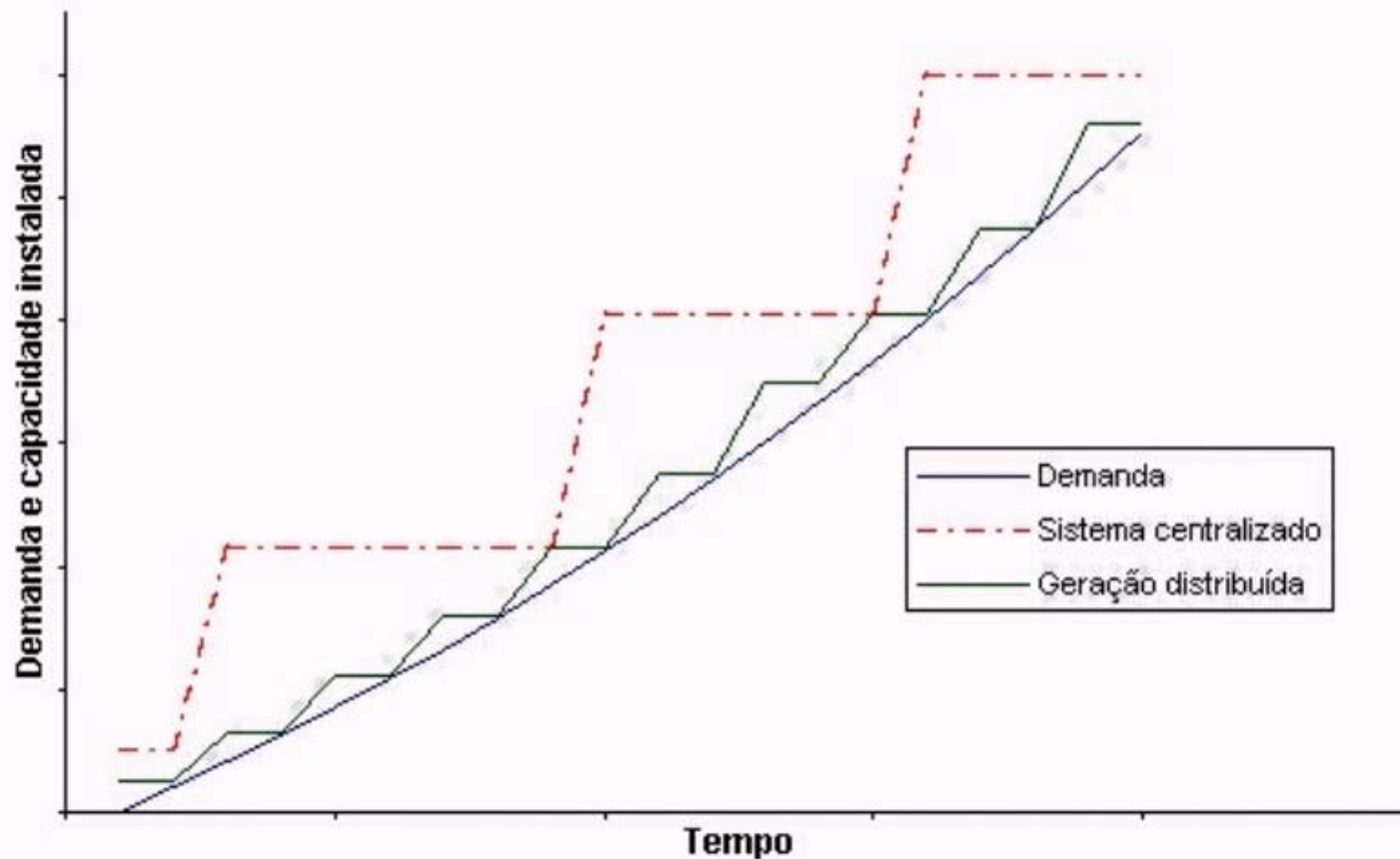


Distribuída

Centralizada



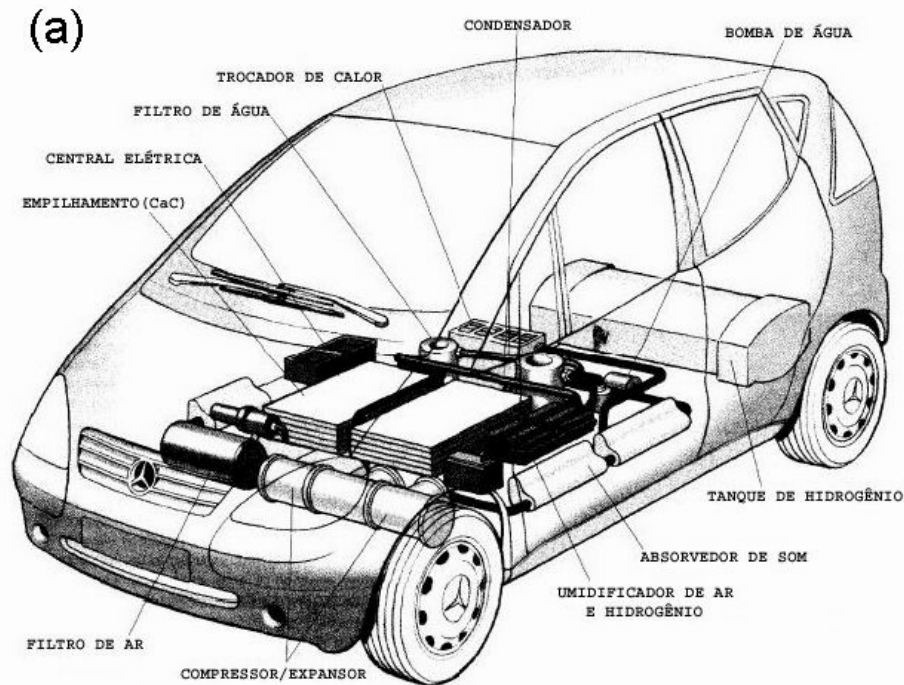
Centralizada X Distribuída



Célula a Combustível Aplicações – Geração Estacionária



Célula a Combustível Aplicações Veiculares



General Motors



Célula a Combustível Aplicações Veiculares



Phase 1



Phase 3



Phase 4



NEBUS

Phase 2



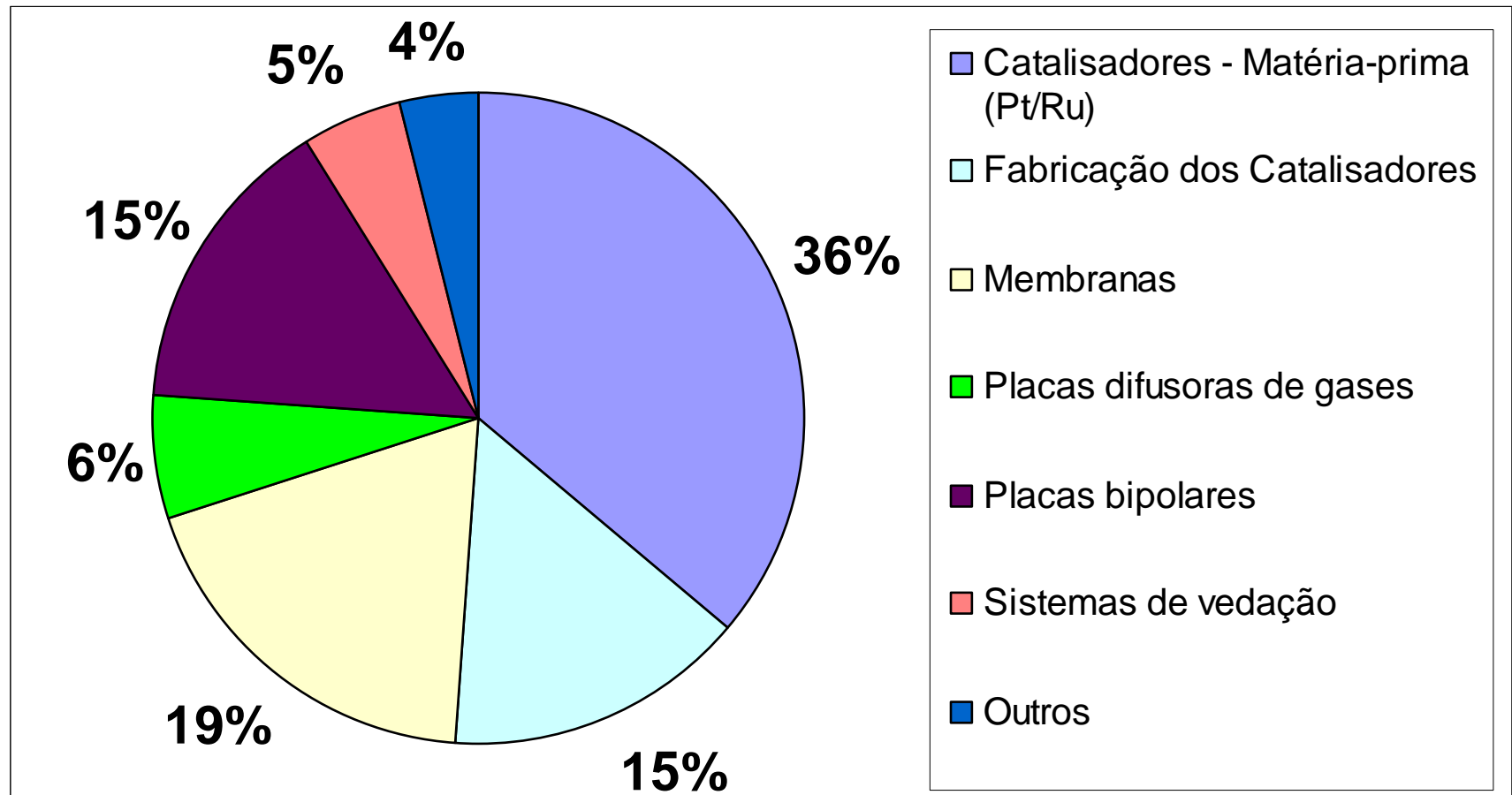
Phase 5

- **Custo (produção, instalação e manutenção);**
- **Escala de produção (unidades por ano);**
- **Número de fabricantes de componentes e unidades;**
- **Receptividade da sociedade (segurança, normas, padrões);**
- **Concorrência entre mercados de energia elétrica e insumos (GN, hidrogênio, etanol, metanol, etc);**
- **Eficiência e durabilidade;**
- **Competição entre tecnologias de GD e entre tecnologias de CaC;**
- **Evolução tecnológica (tolerância a contaminantes, materiais e engenharia dos componentes e engenharia de operação/controlado).**

Eficiência e Custo Relativo dos Componentes

Componente	Eficiência	Custo Relativo
Reformador (Processador de combustível)	79%	40%
Empilhamento de CaC (<i>Fuel Cell Stack</i>)	57%	27%
Condicionamento de Potência	95%	18%
Controle e Instrumentação	90%	15%
Total	39%	100%

Custo Relativo para Preparação de MEA's



Inserção no Mercado

Fatores Críticos

Mercado ↓	⇒ Parâmetros	Doméstico		Comercial		Industrial	
		Gás natural (US\$/kWh)	0,02 – 0,04	0,02 – 0,04	0,02 – 0,04	0,01 – 0,03	
Energia Elétrica (US\$/kWh)		0,08 – 0,16	0,08 – 0,16	0,08 – 0,16	0,04 – 0,12		
Vida Útil da CaC (Anos)	⇒	5 – 12	5 – 12	5 – 12	5 – 12		
Investimento “aceitável” (US\$/kW)		600	1400	400	1800	500	800

Unidade PEMFC tamanho (kW)	Baixo Volume de Produção (10.000 unid/ano)		Alto Volume de Produção (100.000 unid/ano)	
	Preço (US\$/unid.)	US\$/kW	Preço (US\$/unid.)	US\$/kW
10 kW	16.000	1.600	5.000	500
25 kW	25.000	1.000	7.500	300
50 kW	40.000	800	12.000	240

Inserção no Mercado

Fatores Críticos

Combustível	PCI por unidade de massa	PCI por unidade de volume	Massa específica	Referência R\$ ^(*)	R\$/GJ
Hidrogênio	119.600 kJ/kg	9.967 kJ/m ³	0,083 kg/m ³	3/m ³ a 18/m ³	300 a 1.800
Gás natural	49.694 kJ/kg	35.780 kJ/m ³	0,72 kg/m ³	0,50/m ³ a 1,60/m ³	14 a 45
GLP	46.044 kJ/kg	100.836 kJ/m ³	2,19 kg/m ³	29/butijão de 13kg	48
Etanol hidratado	26.378 kJ/kg	21.334 kJ/L	0,809 kg/L	1,57/L	74
Metanol	19.900 kJ/kg	15.820 kJ/L	0,795 kg/L	1,06/L ^(**)	67 ^(**)
Gasolina	44.173 kJ/kg	32.776 kJ/L	0,742 kg/L	2,20/L	67
Diesel	43.335 kJ/kg	36.922 kJ/L	0,852 kg/L	1,54/L	42

(*) Preços: base junho/2003

(**) Metanol: Preço "virtual"

- **Especificação de sistemas, desenvolvimento e avaliação de desempenho de componentes de sistemas de CaC (PEMFC e SOFC);**
- **Desenvolvimento de reformador de etanol em parceria com outras instituições (INT e IPEN)**
- **Simulação e controle de sistemas de geração, à base de CaC, no âmbito da GD;**
- **Modelagem de sistemas de geração para otimização operacional e aproveitamento do rejeito térmico das CaC e do reformador de combustível;**
- **Avaliação técnica e econômica de sistemas à base de CaC.**

Atividades do CEPEL Unidade de Demonstração



Atividades do CEPEL Unidade de Demonstração



❑ **Projetos do Fundo Setorial CT-Energ e CHESF/ANEEL**

❑ **Parceria CEPEL/INT/IPEN**

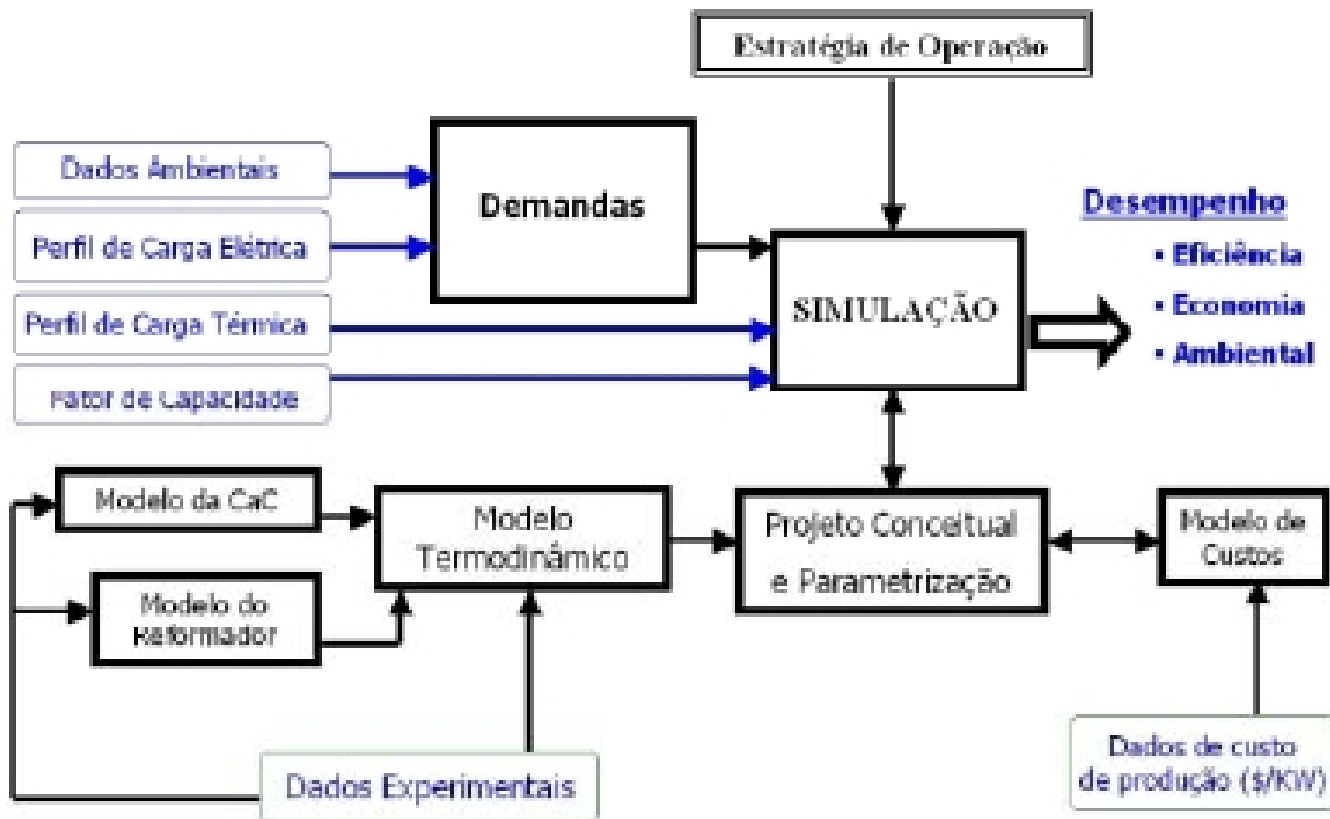
❑ **Objetivos**

- ❑ Estudar a cinética das reações de reforma do etanol
- ❑ Projetar os reatores para a reforma do etanol e para as reações de “shift” e de oxidação do CO
- ❑ Estudar uma rota alternativa de purificação do gás de reforma, através de permeação em membrana de paládio
- ❑ Construir o sistema de produção de hidrogênio a partir do etanol e avaliar o desempenho (eficiência e pureza do H₂)
- ❑ Integrar o reformador à CaC existente no CEPEL.



Desenvolvimento de placas separadoras metálicas revestidas

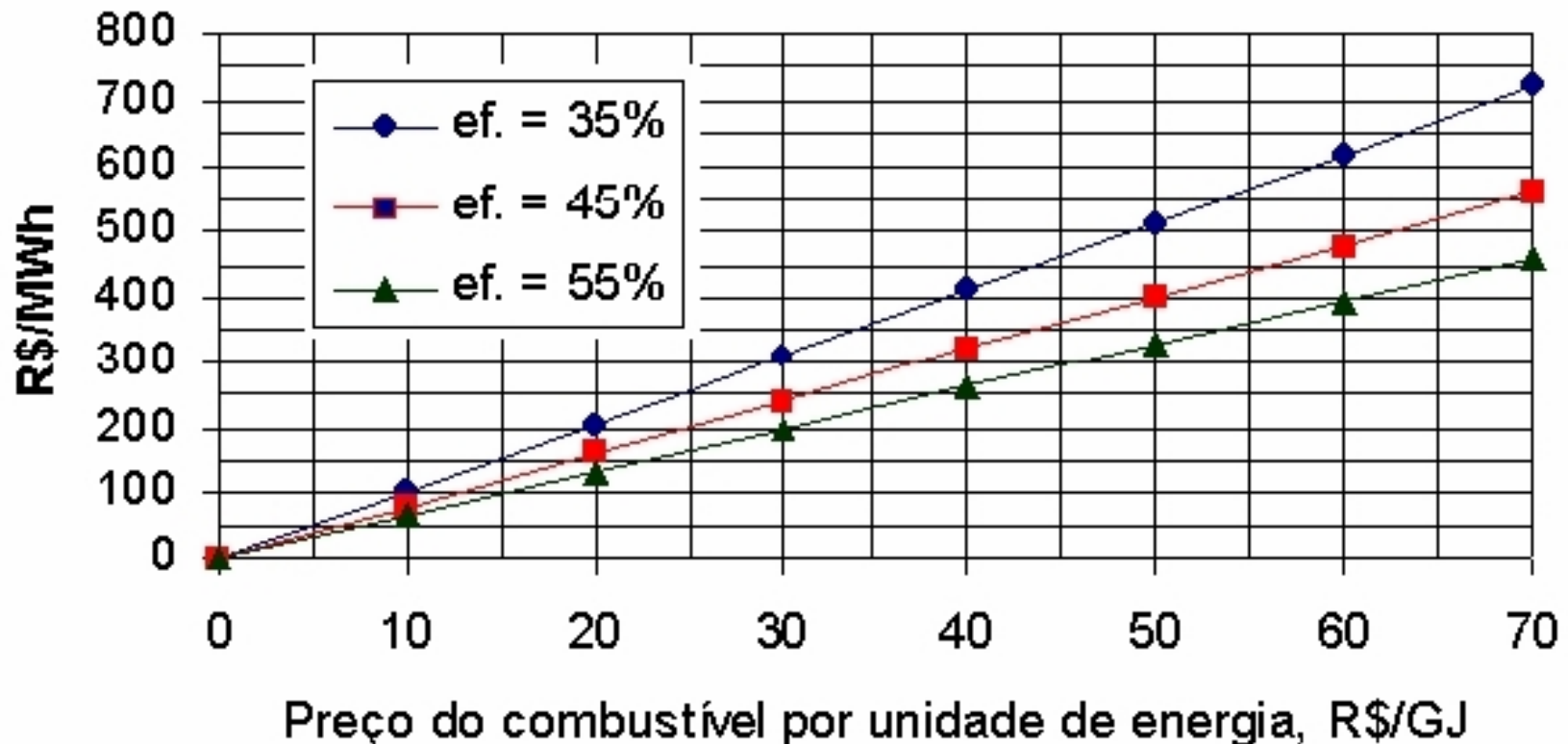
Diagrama de Blocos do Projeto de Modelagem do Sistema Otimização Operacional e Aproveitamento do Rejeito Térmico



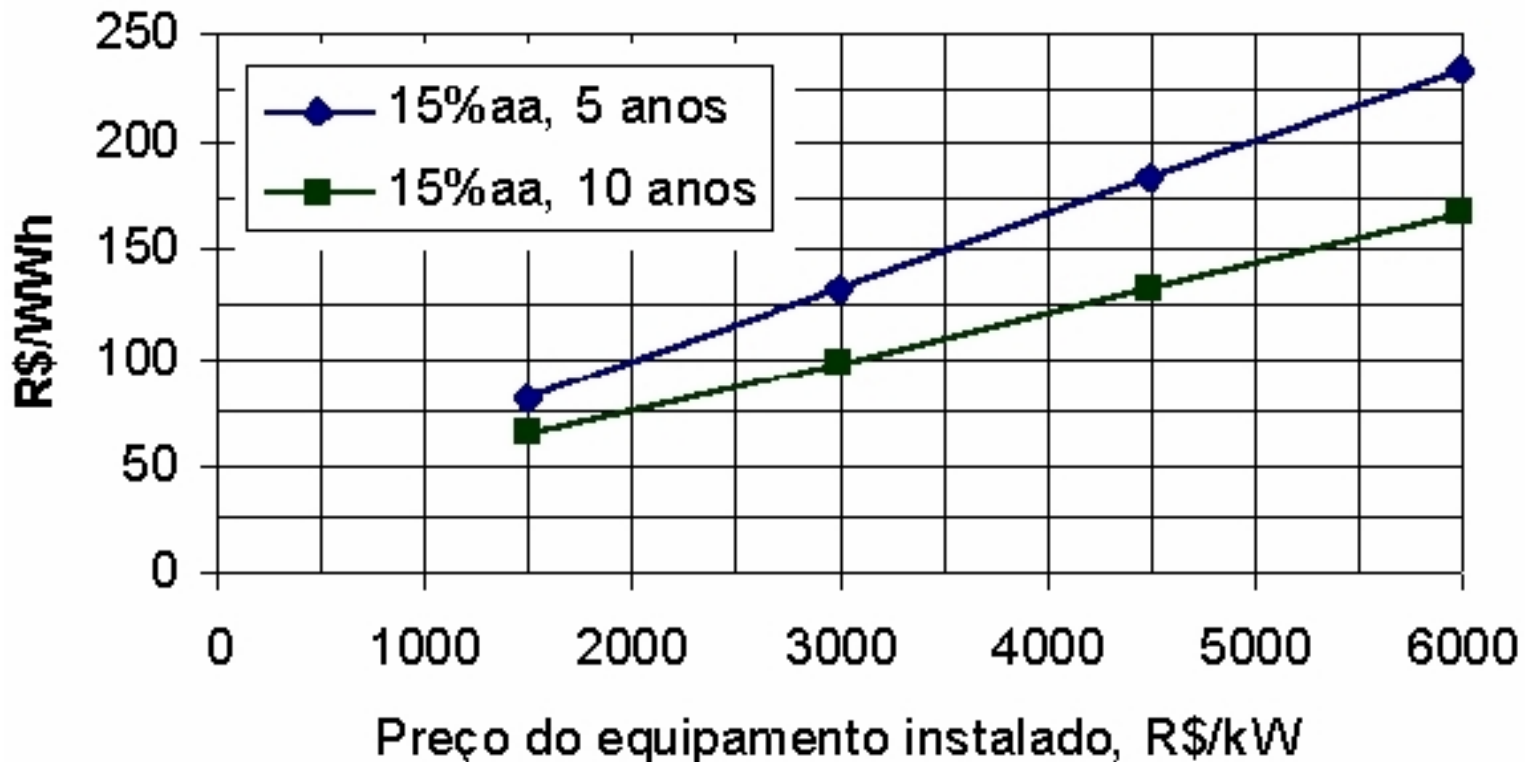
Atividades do CEPEL

Análise Técnico-econômica

Parcela do custo de geração devido ao combustível, em função do preço específico do combustível e da eficiência elétrica considerada.



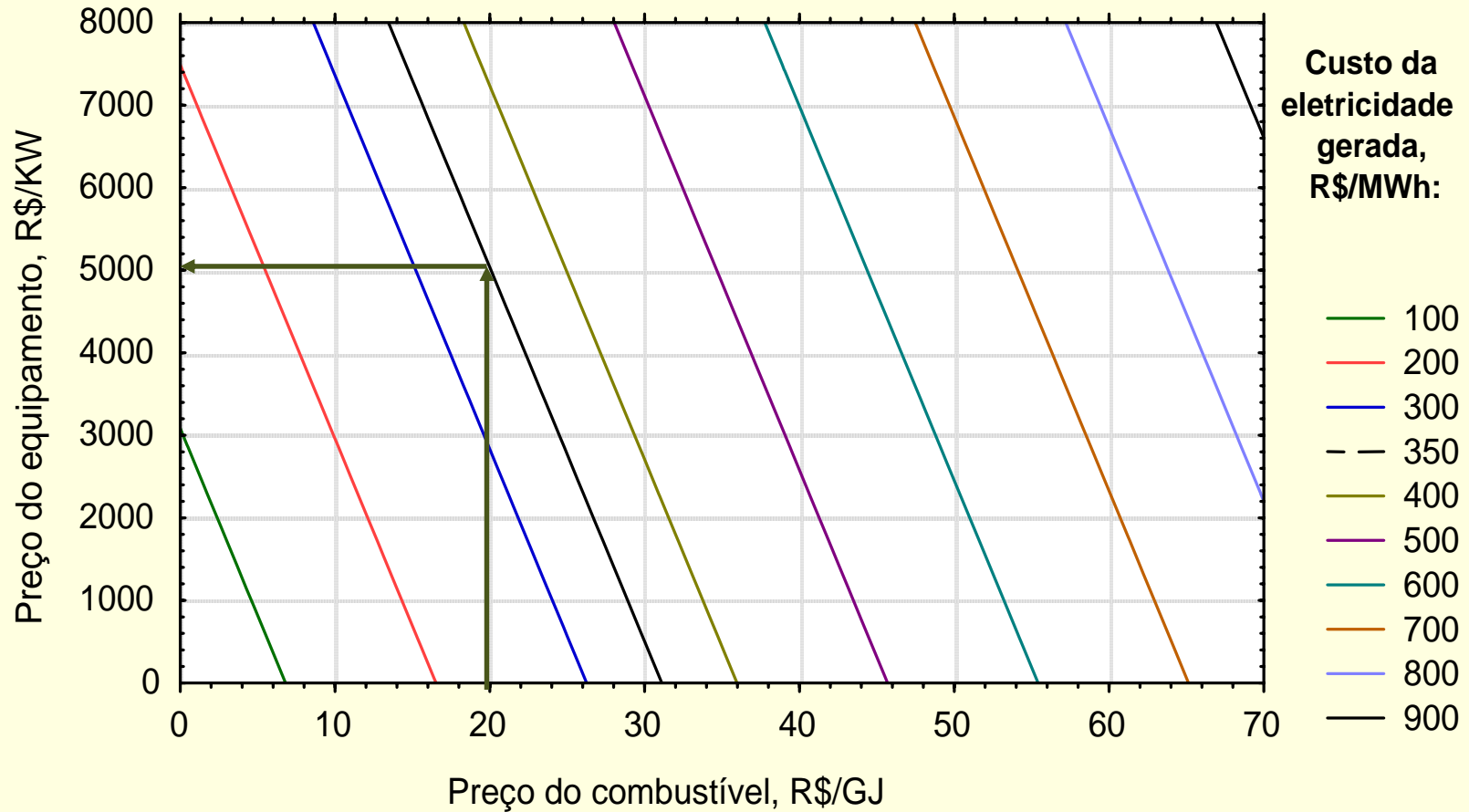
Parcela do custo de geração devido aos investimentos e ao tempo de amortização do investimento. A parcela de O & M já está somada nas curvas apresentadas.



Atividades do CEPEL

Análise Técnico-econômica

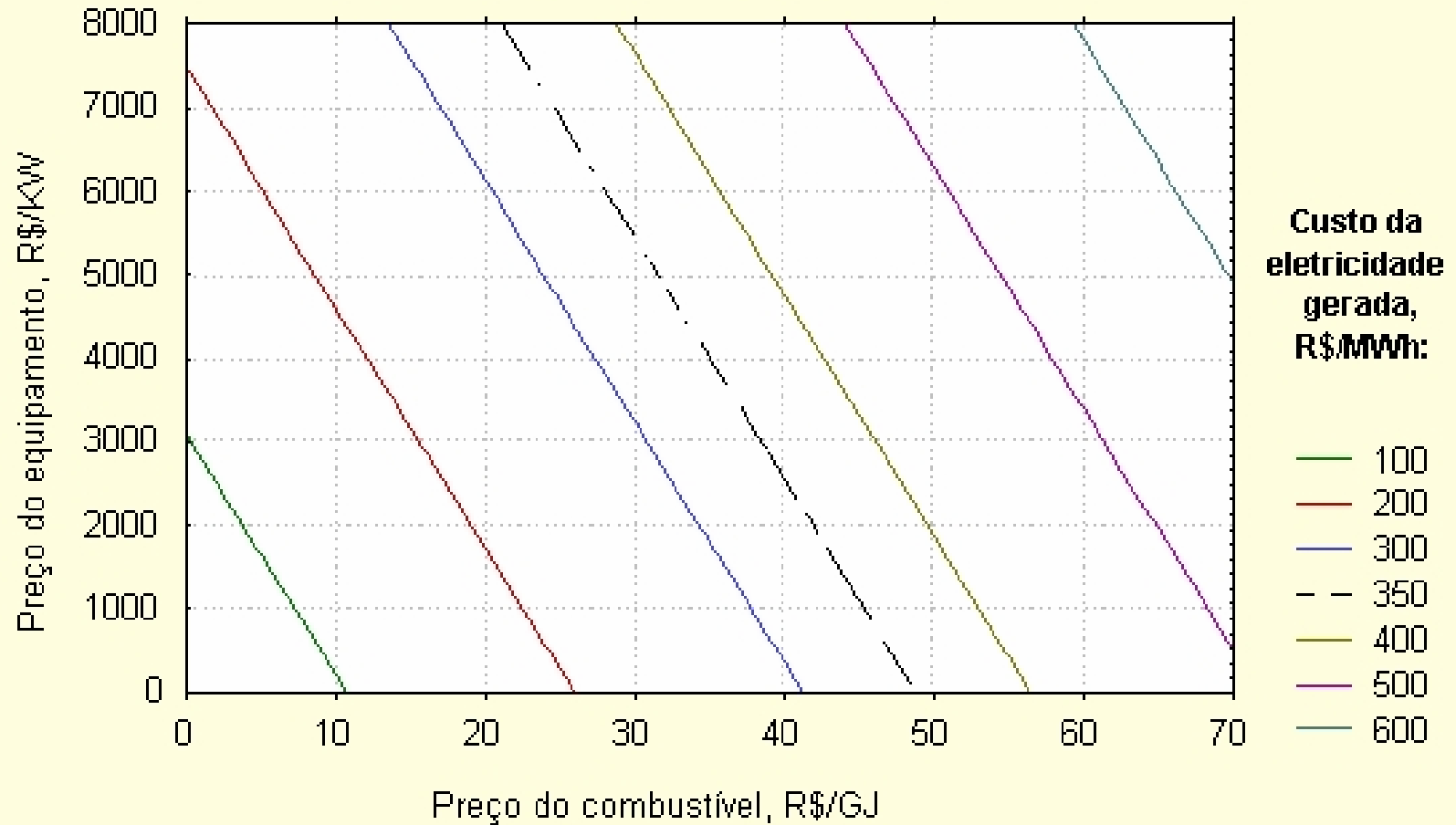
15%aa, 10anos, ef. = 35%



Atividades do CEPEL

Análise Técnico-econômica

15%aa, 10 anos, ef. = 55%



Caso Base da Análise de Sensibilidade

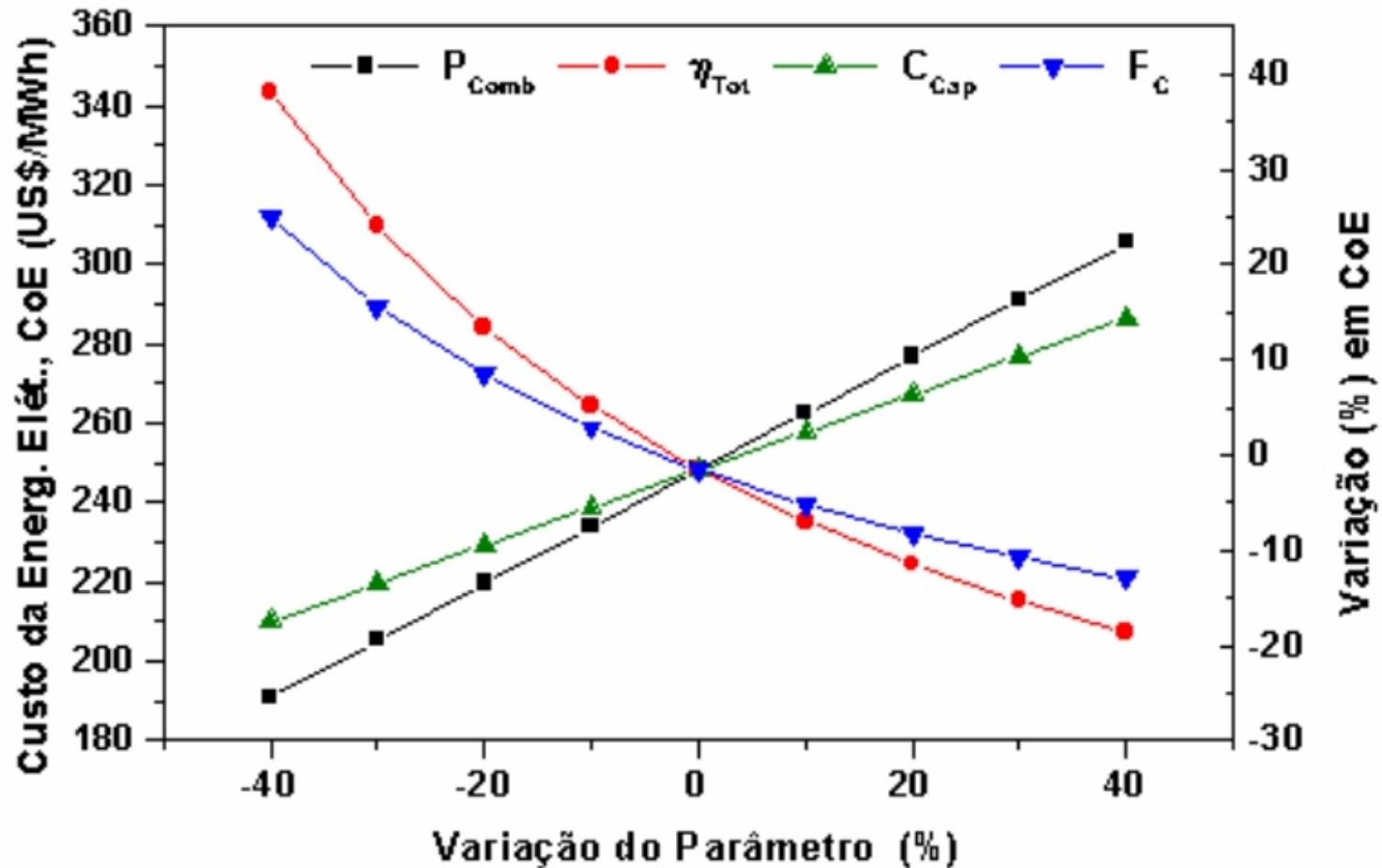
Parâmetro	Valor no Caso Base	Variação
P_{Comb}	11,43 US\$/GJ	-40% a +40%
C_{Cap}	2.000 US\$/kW	
F_C	0,7143	
η_{Tot}	0,288	Constante
FA(j = 0,15; n=5)	0,2983	
CO&M	0,01 US\$/kWh	

$$CoE = f(P_{Comb}, \eta_{Tot}, C_{cap}, F_c)$$

$$CoE \text{ (US\$/MWh)} = 3,6 \frac{P_{Comb} \text{ (US\$/GJ)}}{\eta_{Tot}} + 10^3 \cdot CO \& M \text{ (US\$/kWh)} + \frac{FA(j, n)}{8,76 \cdot F_C} \cdot C_{Cap} \text{ (US\$/kW)}$$

$$\delta CoE = C_1 \cdot \delta P_{Comb} - \frac{C_2}{\eta_{Tot}^2} \cdot \delta \eta_{Tot} + C_3 \cdot \delta C_{Cap} - \frac{C_4}{F_C^2} \cdot \delta F_C$$

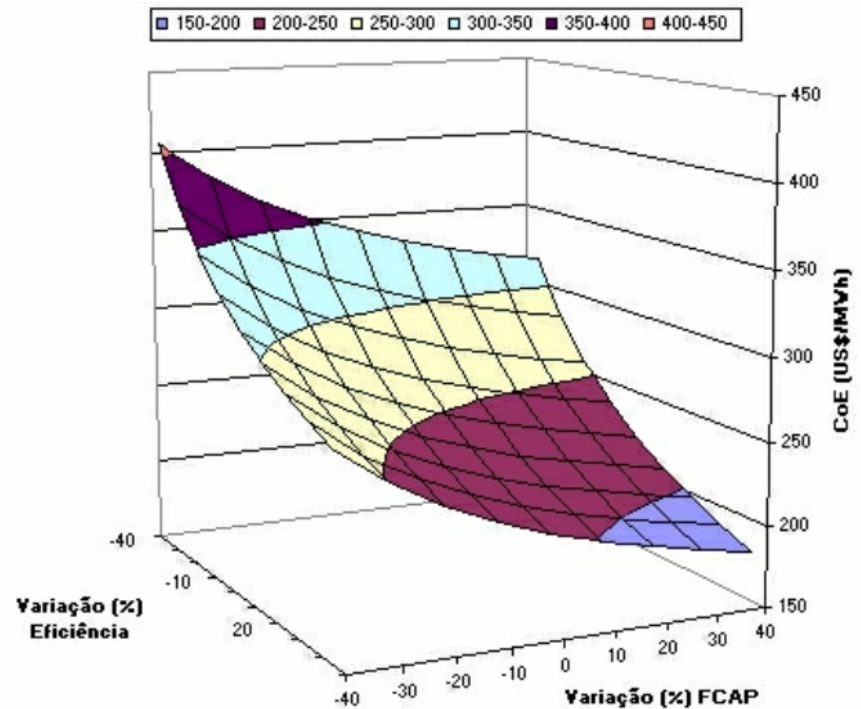
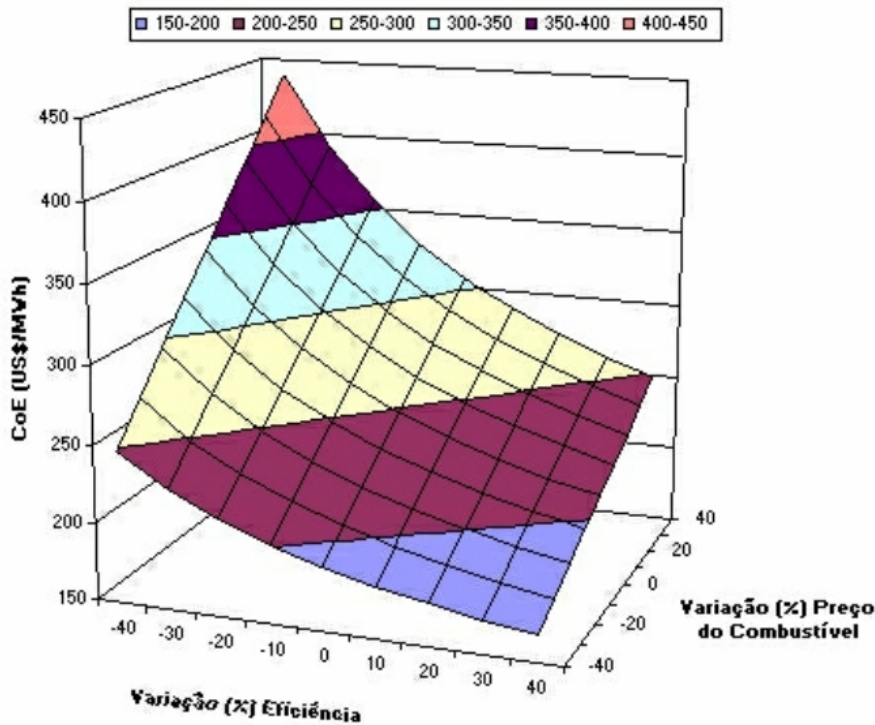
Análise de sensibilidade monoparamétrica



Análise de sensibilidade biparamétrica

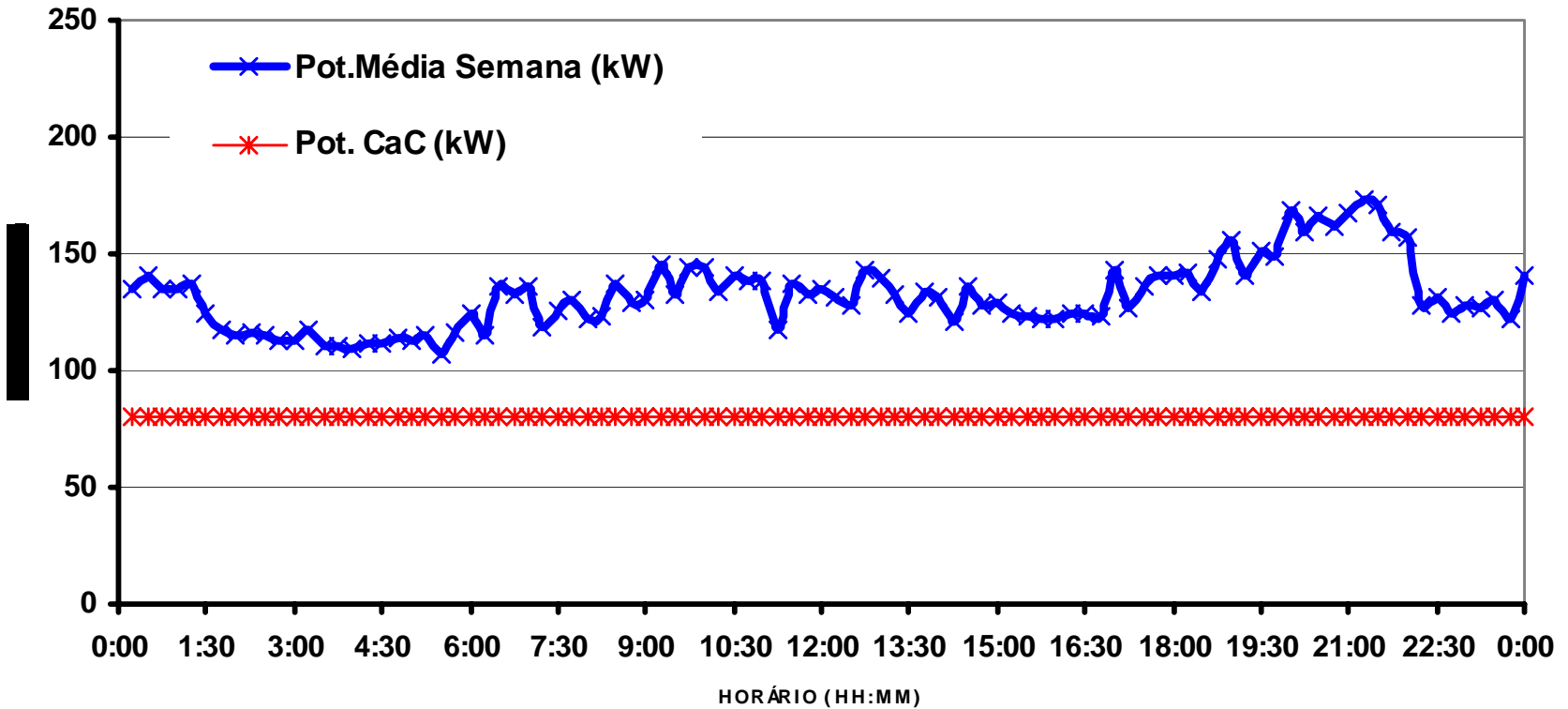
$$\delta C_{oE} = C_1 \cdot \delta P_{Comb} - \frac{C_2}{\eta_{Tot}} \cdot \delta \eta_{Tot}$$

$$\delta C_{oE} = \frac{C_2}{\eta_{Tot}} \cdot \delta \eta_{Tot} - \frac{C_4}{F_c} \cdot \delta F_c$$



Atividades do CEPEL

Análise Técnico- econômica



Edifício residencial de classe média com 116 unidades

Atividades do CEPEL

Análise Técnico- econômica

DADOS DE ENTRADA		
I. Carga Elétrica		
Demanda de Pico	173.0	kW
Consumo Anual de Eletricidade	1,158,728	kWh/ano
Demanda Mínima	106.6	kW
Demanda Média	132.3	kW
II. Carga Térmica		
Demanda Térmica Anual	2,760.3	GJ/ano
Forma de Aquecimento de Água	2	Chuv=1 Gas=2
Deslocamento % Anual da Carga Térmica	100%	%
Deslocamento Anual do Consumo de Gás	2,760.3	GJ/ano
Temperatura Requerida	60	°C
Eficiência do Sistema de Aquecimento	85%	%
Energia Térmica Requerida	3,247.5	
III. Célula a Combustível		
Potência	80.1	kW
Fator de Carga sem Venda de EE para a Concessionária	100%	%
Fator de Carga com Venda de EE para a Concessionária	100%	%
Meses de Operação por Ano	12	mês/ano
Potência Média de Operação	80.1	KW
Eficiência Elétrica	35%	%
Eficiência Térmica	45%	%
Venda de Energia para a Concessionária?	1	S=1/N=2
Preço de Venda	0.082	R\$/kWh
Custo Unitário de Instalação da CaC	2,201.41	US\$/kW
Custo de Instalação da CaC	470,686.46	R\$
IV. Custos da Energia		
Demanda	0.00	R\$/kW/mês
Eletricidade (Média Residencial Light)	0.316	R\$/kWh
Eletricidade (Média Light)	0.216	R\$/kWh
Combustível (Gás Natural Industrial)	22.21	R\$/GJ
Custo Marginal de Capacidade Instalada	131.20	R\$/kWano
Incentivo/Benefício Concedido pela Concessionária EE	30.00%	%
Desconto na tarifa de GN	0%	%
Manutenção variável	0.040	R\$/kWh
Manutenção fixa	27,065.13	R\$
Forma de Cobrança da Manutenção	1	Var=1 Fixa=2
V. Fatores Econômicos		
Taxa de Juros	15%	%aa
Vida Útil	10	ano
Fator de Anualização do Investimento	0.2240	
VI. Forma de Operação		
Acompanhamento de Carga ou Potência Fixa	1	Acomp=1 Fixa=2
A CaC Posterga Investimentos para a Concessionária?	1	S=1/N=2
Fator de Carga Médio da Concessionária	69%	%

DADOS DE SAÍDA		
I. Energia Associada à CaC		
I.1. Energia Elétrica Produzida	701,620	kWh/ano
I.2. Energia Térmica Produzida	3,247.8	GJ/ano
I.3. Energia Requerida do Combustível	7,216.7	GJ/ano
I.4. Combustível Cons. (Volume) GN Acomp. Carga	183,369	Nm3/ano
II. Energia Deslocada pela CaC		
II.1. Redução na Demanda Anual com Acomp.de Carga	80.1	kW.ano
II.1a. Redução na Demanda Anual com CaC na Base	80.1	kW.ano
II.2. Eletricidade Consumida no Imóvel	701,620	kWh/ano
II.3. Eletricidade Vendida à Concessionária	0	kWh/ano
II.4. Energia Térmica Aproveitada	3,247.5	GJ/ano
III. Economia Energética Anual (Consumidor)		
III.1. Eletricidade	221,712.04	R\$/ano
III.2. Energia Térmica	72,137.22	R\$/ano
III.3. Receita de Venda de Eletricidade	0.00	R\$/ano
IV. Despesas Anuais (Consumidor)		
IV.1. Combustível	160,307.20	R\$/ano
IV.2. Manutenção	28,099.90	R\$/ano
IV.3. Amortização do Investimento	105,442.16	R\$/ano
V. Incentivos/Subsídios		
V.1. Incentivo Anual Concedido pela Concessionária	0.00	R\$/ano
V.2. Desconto na tarifa de Gás	0.00	R\$/ano
VI. Balanços Econômicos		
VI.I. CONSUMIDOR		
VI.I.a. Economias e Receitas Anuais	293,849.26	R\$/ano
VI.I.b. Despesas Anuais	293,849.26	R\$/ano
VI.I.c. Incentivos e Subsídios	0.00	R\$/ano
GANHO (PERDA) PARA O CONSUMIDOR	0.00	R\$/ano
VI.II. CONCESSIONÁRIA		
VI.II.a. Postergação de Investimentos (Demanda)	7,250.72	R\$/ano
VI.II.b. Energia Disponibilizada (Venda Tarifa Média)	104,763.15	R\$/ano
VI.II.c. Energia Residencial não Vendida após CaC	221,712.04	R\$/ano
GANHO (PERDA) PARA A CONCESSIONÁRIA	(109,698.17)	R\$/ano

CÉLULAS A COMBUSTÍVEL:

**Uma Alternativa para Geração
de Energia e sua Inserção
no Mercado Brasileiro**



**Eduardo T. Serra
José Geraldo de M. Furtado
Guilherme Fleury W. Soares
Alcides Codeceira Neto**

Livro publicado pelo CEPEL

- Introdução
- Células a Combustível
- O Combustível das Células a Combustível
- Custos Futuros
- Cenários de Progressão Tecnológica
- Mercado
- Impactos da Inserção das Células a Combustível no Mercado das Concessionárias de Energia Elétrica

- ❑ O sistema elétrico brasileiro difere substancialmente da maioria dos países desenvolvidos, pela predominância da geração hidráulica de energia elétrica;
- ❑ Fatores ambientais **ainda** não pressionam o emprego de células a combustível na geração estacionária;
- ❑ Existem nichos de mercado para as células a combustível, relacionados à **qualidade e confiabilidade da energia elétrica gerada**;

- ❑ A competição entre o **custo da energia elétrica e o dos insumos energéticos** pode criar um mercado para células a combustível (residencial e comercial), desde que haja uma redução de custo das mesmas (US\$/kW);

- ❑ O atendimento de **comunidades isoladas** através de células a combustível pode ser atrativo pela diversidade de combustíveis.

- ❑ Há necessidade de aperfeiçoamento da tecnologia de CaC (**aumento da eficiência e redução dos custos de investimento**);
- ❑ As CaC podem se beneficiar de subsídios em um cenário de incentivos a implementação de **tecnologias eficientes e limpas**;
- ❑ O aproveitamento e a contabilização do rejeito térmico (**co-geração - aquecimento ou refrigeração**) implica em aumentar a eficiência de utilização do combustível.

Obrigado

Contato: Eduardo T. Serra
Pesquisador Consultor
Diretoria de P&D
etserra@cepel.br
(21) 2598 6163



Ministério de
Minas e Energia