

microturbinas associadas a CaC em sistemas de co-geração ou ainda a utilização de etanol como fonte de hidrogênio para CaC, são opções tecnológicas com alta possibilidade de utilização em médio prazo.

As CaC deverão ocupar uma posição de destaque na geração distribuída, a médio e longo prazo, na medida que atinjam custos unitários de instalação competitivos com as demais tecnologias, que venham a ocupar nichos de mercado específicos para sistemas de alta qualidade de energia ou que possam se beneficiar dos incentivos para introdução de tecnologias limpas de geração.

2.0 - CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

As CaC constituem uma forma limpa, silenciosa e eficiente de geração de eletricidade e calor a partir de combustíveis como hidrogênio, gás natural, metanol, etanol ou outros hidrocarbonetos. Trata-se de um dispositivo eletroquímico em que um combustível e um agente oxidante reagem, produzindo eletricidade diretamente. Uma vez que este processo não segue o ciclo termodinâmico, as temperaturas elevadas não são necessárias para uma boa eficiência. Para as concessionárias de energia elétrica as CaC apresentam um conjunto de vantagens potenciais, embora também possam ser apontadas algumas desvantagens relacionadas às incertezas inerentes às novas tecnologias. A Tabela 1, sem a pretensão de ser exaustiva, relaciona as vantagens e as desvantagens das CaC.

TABELA 1 – Vantagens e Desvantagens das CaC

Vantagens	Desvantagens
Perspectiva de alta eficiência e confiabilidade	Vida útil limitada (vida útil real desconhecida)
Excelente desempenho em cargas parciais	Eficiência elétrica decrescente ao longo da vida útil
Ausência ou baixas emissões de poluentes	Investimento inicial ainda muito elevado
Expectativa de intervalos elevados entre falhas	Poucas unidades de demonstração
Silenciosas pela ausência de partes móveis	Poucos provedores da tecnologia
Modularidade e operação remota possíveis	Tecnologia pouco divulgada para geração estacionária
Flexibilidade de utilização de combustíveis	Requer infra-estrutura de suprimento de combustíveis

Adicionalmente, as CaC possibilitariam que qualquer consumidor se tornasse um produtor independente de energia elétrica e um co-gerador de energia, assim como permitiriam que as concessionárias de gás se tornassem, indiretamente, empresas fornecedoras de energia elétrica a partir da reforma do gás natural e posterior utilização do hidrogênio em CaC. Estes dois fatos podem, ao menos teoricamente, constituírem ameaças para o negócio das concessionárias de energia elétrica.

Embora o gás natural seja o combustível preferencial, por questões de disponibilidade, custo e pela experiência acumulada no setor de petróleo, qualquer outro combustível capaz de ser reformado para produção de um gás rico em hidrogênio é um candidato potencial para emprego nas CaC. Abre-se, portanto, um cenário promissor para os gases resultantes da digestão de rejeitos urbanos e agrícolas, da gaseificação do carvão, da madeira ou do bagaço de cana, ou ainda da reforma da amônia, do metanol ou do etanol.

As CaC de membrana polimérica (PEMFC, do inglês *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) têm alta densidade de potência, de 0,8 W/cm² a 1,0 W/cm², e trabalham em baixa temperatura, apresentando partida rápida e respondendo com flexibilidade às variações de carga. Devido a estes fatores, estas CaC são as que vêm sendo mais focalizadas para aplicações veiculares. As perspectivas de uso automotivo constituem a principal motivação para o desenvolvimento tecnológico e de redução de custos para viabilizar a sua comercialização, e isto tem ajudado o seu desenvolvimento para o uso em geração elétrica estacionária, mormente em aplicações residenciais e em unidades comerciais de baixo consumo de energia.

A Figura 1 apresenta, esquematicamente, os componentes básicos de um sistema de geração de energia elétrica com CaC de membrana polimérica utilizando reforma de combustível. Os componentes principais são o reformador, onde o combustível é transformado em um gás rico em hidrogênio; o núcleo da CaC; o circuito elétrico com o inversor CC/CA; e os circuitos auxiliares de refrigeração do conjunto e de umidificação da membrana. Uma unidade completa envolverá, necessariamente, os equipamentos de monitoramento e controle. No caso de se utilizar o hidrogênio direto como combustível, elimina-se o reformador.

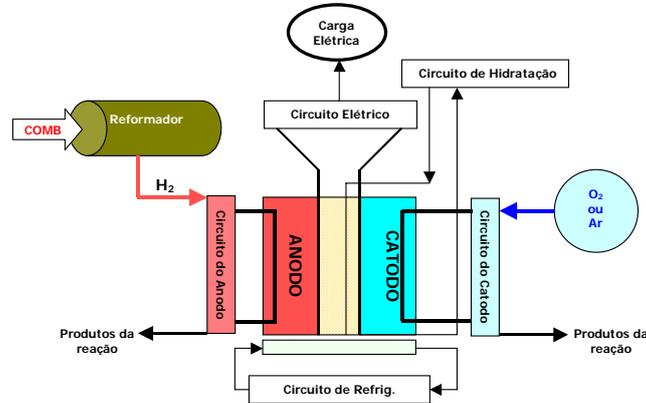


FIGURA 1 – Representação esquemática dos componentes básicos de uma CaC de membrana polimérica.

O núcleo de uma CaC é formado por um empilhamento de células unitárias e placas separadoras bipolares, sendo que estas têm a função de separar as células unitárias e coletar a corrente elétrica de cada uma delas, além de direcionar o fluxo de gases (hidrogênio no anodo e oxigênio ou ar no catodo). Cada célula unitária é constituída pelo conjunto anodo/membrana polimérica/catodo, denominado MEA (*Membrane-Electrode-Assembly*), onde ocorrerão as reações eletroquímicas e o transporte iônico. Sob o aspecto de custo, o MEA representa, atualmente, o componente mais oneroso do empilhamento¹. A eficiência de uma CaC operando reversivelmente é dada por:

$$\eta_{IDEAL} = (\Delta G / \Delta H) = (237,1 \text{ kJ/mol}) / (285,8 \text{ kJ/mol}) = 0,83$$

Onde ΔG e ΔH são, respectivamente, a energia livre de Gibbs e a entalpia da reação ($H_2 + 1/2 \cdot O_2 \rightarrow H_2O$). Contudo, esta é a eficiência teórica (ideal) de uma CaC operando com hidrogênio e oxigênio puros e sob as condições supracitadas, e assume que a diferença de potencial obtida na célula (V_{REAL}) seja igual ao potencial termodinâmico da reação em circuito aberto ($V_{IDEAL} = 1,229 \text{ V}$). Para uma CaC real, o potencial obtido é sempre inferior ao valor ideal, devido às perdas associadas aos fenômenos de polarização que ocorrem em células eletroquímicas. A eficiência de uma CaC real será sempre menor que 83%, sendo dada por:

$$\eta_{REAL} = (V_{REAL}) / (V_{IDEAL})$$

A Figura 2 mostra esquematicamente a influência dos fenômenos de polarização sobre a curva de potencial versus densidade de corrente elétrica de uma CaC.

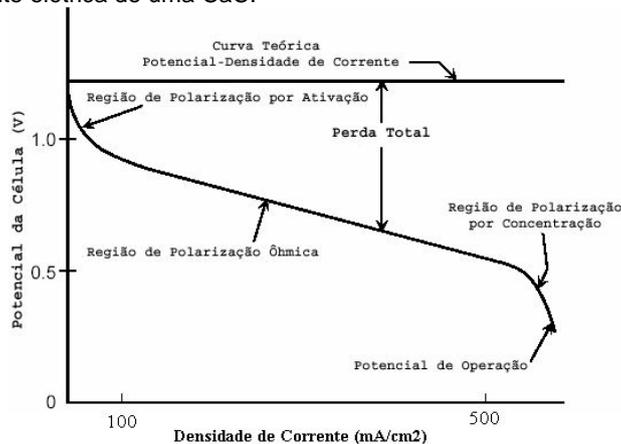


FIGURA 2 – Curvas de potencial versus densidade de corrente ideal e real de uma célula a combustível. As perdas associadas à polarização por ativação estão relacionadas aos processos cinéticos que ocorrem nos eletrodos. Os estudos relacionados à obtenção de novos eletrocatalisadores ou à otimização dos existentes têm

por objetivo a redução das perdas por ativação, bem como a redução de custos destes catalisadores. As perdas devidas à polarização por resistência ôhmica estão relacionadas às resistências ao fluxo de íons no eletrólito e ao fluxo de elétrons através dos eletrodos, além das resistências de contato. A redução deste tipo de perda requer o desenvolvimento de novos eletrólitos e o aperfeiçoamento do projeto das células unitárias². No caso das PEMFC as condições de umidificação da membrana têm um papel preponderante, uma vez que estas determinam a condutividade iônica da mesma. A polarização por concentração tem sua origem no estabelecimento de um gradiente de concentração do reagente que é consumido no eletrodo através da reação eletroquímica sendo mais significativa na região de altas densidades de corrente.

Os processos de polarização por ativação e por concentração ocorrem em ambos os eletrodos de uma CaC. O fluxo de corrente em uma CaC proporciona o aumento do potencial anódico (V_{anod}) e o decréscimo do potencial catódico (V_{cat}), reduzindo a tensão da célula (V_C), a qual inclui ainda as perdas ôhmicas ($i \cdot R$), segundo a equação:

$$V_C = V_{cat} - V_{anod} - i \cdot R$$

Onde i é a corrente que flui através da célula e R é a resistência total (eletrônica, iônica e de contato).

A tensão total (V_T) obtida no empilhamento da CaC é o somatório dos potenciais de cada célula unitária ou, sob condições otimizadas, tem-se:

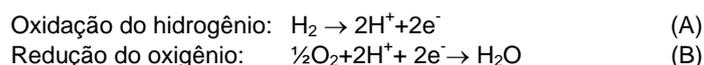
$$V_T = n \cdot V_C$$

Onde n é o número de células unitárias e V_C é o potencial de uma célula unitária. A corrente do empilhamento é igual à corrente de uma única célula unitária, comportando-se como um conjunto de fontes CC ligadas em série.

Na prática, o desempenho e a curva tensão versus densidade de corrente de uma CaC são influenciados por diversas variáveis operacionais, tais como temperatura, pressão, composição dos gases, grau de utilização dos reagentes, densidade de corrente, etc., além de outros fatores como presença de contaminantes nos gases reagentes e o próprio tempo de serviço acumulado pela unidade.

As reações eletroquímicas de oxidação do hidrogênio e de redução do oxigênio requerem a presença de catalisadores, que constituem um dos principais fatores de custo dos eletrodos. A redução da quantidade de catalisador (mgPt/cm^2) com o aumento simultâneo das taxas das reações eletroquímicas nos eletrodos é um dos grandes desafios para a penetração das CaC no mercado e, portanto, um tema de pesquisa e desenvolvimento. Nas últimas décadas, obteve-se uma redução significativa da carga de Pt (superior a 100 vezes nos últimos 30 anos) em decorrência de técnicas de dispersão das partículas de Pt e do aumento do volume do eletrodo abrangido pelo catalisador². Mesmo com a redução da quantidade de catalisador para valores abaixo de $0,2 \text{ mgPt}/\text{cm}^2$, a densidade de potência aumentou de valores abaixo de $0,1 \text{ W}/\text{cm}^2$ para valores superiores a $0,8 \text{ W}/\text{cm}^2$.

As reações eletroquímicas que ocorrem nos eletrodos das células unitárias são:



As reações parciais (A) e (B) proporcionam um fluxo contínuo de elétrons do anodo para o catodo, o qual será mantido enquanto o anodo estiver recebendo hidrogênio e o catodo o gás oxidante (oxigênio ou ar). A reação de redução do oxigênio (B) é a etapa lenta do processo (três ordens de magnitude menor que a da reação de oxidação do hidrogênio (A)). Assim, um grande desafio é incrementar a atividade eletrocatalítica da reação (B).

3.0 - CARACTERÍSTICAS DO PROJETO

O projeto de demonstração foi especificado de forma a possibilitar o acompanhamento da operação e ser capaz de simular a carga de consumidores residenciais. As características de desempenho a serem avaliadas são: eficiência energética (elétrica e térmica), eficiência dos subsistemas (reformador, empilhamento de células, inversor), otimização operacional sob o aspecto energético, capacidade de acompanhamento de carga simulada, operação em stand-by e operação em paralelo à rede. Paralelamente, o projeto inclui a implantação de um laboratório para estudos de células unitárias e uma análise técnico empresarial das CaC de membrana polimérica englobando custos futuros, cenários de progressão tecnológica, mercado das CaC e impacto do emprego das CaC no mercado de uma concessionária de energia elétrica.

A potência selecionada para a CaC foi de 5 kW, considerada adequada para o suprimento de unidades residenciais de classe média alta ou de um conjunto de residências de baixo consumo, ou ainda, uma unidade comercial de pequeno porte. A Figura 3 corresponde à CaC instalada no CEPEL e já submetida aos ensaios de aceitação com emprego de hidrogênio direto. O reformador de gás natural nos ensaios iniciais foi capaz de

produzir 65-66 L H₂/min, a 2 psi, com um consumo de 25 L/min de gás natural. O reformador utiliza um sistema de membrana para purificação do reformado, resultando em um fluxo de hidrogênio com apenas 0,5 ppm de CO, 1,8 ppm de CO₂ e 160 ppm de CH₄.



FIGURA 3 - CaC de membrana polimérica de 5 kW, e reformador de GN instalados no CEPTEL.

4.0 - O MERCADO DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

As CaC estacionárias podem ser empregadas em diferentes situações, tais como:

- Fonte de energia substituindo a rede, ou provendo eletricidade em localidades não interligadas à rede;
- Fonte de energia suplementar operando em paralelo ou interconectada à rede tanto na base como para atendimento da demanda de ponta. Na condição interconectada à rede o sistema permitiria o fluxo de potência em ambas as direções, com o excesso de potência sendo exportado para a rede, sempre que a demanda local for inferior à potência nominal;
- Em combinação com fontes renováveis de energia intermitentes produzindo energia nos períodos em que aquelas fontes não atendessem à demanda;
- Proporcionando "back-up" na indisponibilidade da rede ou de qualquer outra fonte de energia.

Em termos da potência nominal, as CaC podem ser divididas em algumas classes:

- 1 a 10 kW para aplicações residenciais unifamiliares e unidades auxiliares de potência;
- 10 a 50 kW para aplicações em prédios residenciais grupo de residências unifamiliares ou residências de elevado padrão de consumo, pequenas unidades comerciais;
- 50 a 250 kW para aplicações em prédios comerciais, pequenas comunidades isoladas, hotéis, hospitais e instalações remotas;
- acima de 250 kW para aplicações de grande consumo associadas à co-geração.

No que se refere à geração estacionária, as expectativas do mercado indicam que as CaC para uso residencial terão, inicialmente, uma penetração maior no Japão do que nos EUA e na Europa. A eficiência elétrica dos sistemas completos de geração com CaC situa-se na faixa de 27 a 40%, em função da eficiência de cada um dos componentes. Quando o sistema opera em co-geração pode-se obter eficiência global de até 90%.

Com base em expectativas indicadas na literatura, as CaC não teriam perspectivas de apresentar vantagens econômicas em relação ao suprimento elétrico pela rede convencional, pelo menos até 2010. A partir do começo da próxima década, espera-se que esta situação passe a mudar progressivamente, dependendo da redução de preços não só das CaC como também dos reformadores de gás natural, que é o único combustível que, potencialmente, a curto-prazo poderá permitir a competição com a eletricidade da rede. Para o caso brasileiro, o etanol também merece ser levado em conta, a despeito do seu custo específico, por considerações de ordem estratégica, ambiental e sócio-econômica. Dentre as barreiras a serem ultrapassadas até 2010 encontra-se o custo unitário das CaC (ainda superior a US\$5.000/kW) e os problemas de logística e custo dos combustíveis. O hidrogênio tem alto custo de produção, e problemas de transporte e armazenagem. Outros combustíveis como o gás natural, o etanol e o metanol apresentam vantagens quanto a transporte e estocagem, mas necessitam ser reformados para a produção de hidrogênio. Pequenos reformadores de gás natural, metanol e etanol estão sendo desenvolvidos, mas ainda é incerta a velocidade de redução dos custos de fabricação destes equipamentos.

Como freqüentemente acontece com as novas tecnologias, a maturação tecnológica e econômica das CaC deverá ocorrer simultaneamente e se beneficiando de aplicações em nichos muito específicos, onde as soluções convencionais apresentem preços muito elevados. À medida que as CaC forem ficando mais acessíveis, os nichos de aplicação serão ampliados. Pode-se imaginar a seguinte progressão relativa (disposta em ordem temporal e decrescente de custos da alternativa convencional em cada caso) à inserção das CaC: como sistemas de "no-

break”, em substituição de sistemas fotovoltaicos, como “back-up” de processos críticos, em substituição de geradores diesel estacionários e nos setores residencial e comercial competindo com a rede.

5.0 - ANÁLISE ECONÔMICA

Efetou-se uma análise de sensibilidade biparamétrica onde cada par dentre os parâmetros estudados (P_{Comb} , η_{Tot} e FC, η_{Tot}) sofreu simultaneamente a mesma variação. Verificou-se que a maior amplitude de variação do Custo da energia elétrica gerada (CoE) foi obtida em relação à Eficiência (η_{Tot}), seguido, em ordem decrescente de variação da amplitude, do Preço do Combustível (P_{Comb}), Fator de Capacidade (FC) e do Investimento⁴.

Com o objetivo de analisar e quantificar o impacto de um sistema à base de células a combustível sobre os consumidores e uma concessionária do setor elétrico, implementou-se uma planilha no Microsoft Excel® intitulada "Balanço Energético e Financeiro de uma Aplicação de Célula a Combustível". A planilha permite efetuar diversas simulações de operação da CaC tais como: acompanhamento de carga, operação em uma potência fixa com ou sem venda de energia para a Concessionária ou, ainda, na condição operacional ótima sob o aspecto energético (co-geração). Também é possível avaliar, para uma determinada situação de preço das tarifas de energia elétrica e de gás natural, qual o valor máximo do investimento (CaC+reformador) que, em condições ótimas de operação, não acarrete custos adicionais para o consumidor anteriormente suprido pela rede. Da mesma forma, pode-se determinar o impacto no faturamento da Concessionária pela perda dos Consumidores que passaram a gerar a sua própria energia.

A Figura 4 corresponde à demanda média real de um prédio de 116 unidades residenciais de classe média alta, monitorada durante uma semana em fevereiro de 2004. Com base nesta curva de demanda e no consumo de gás do prédio para aquecimento de água, foram efetuadas simulações de uso da planilha.

A Tabela 2 corresponde a uma representação parcial da planilha contendo os dados de entrada e a simulação para a operação em co-geração (dados de saída), na qual a potência da CaC foi otimizada para o maior aproveitamento energético do combustível utilizado e para um balanço econômico neutro para os Consumidores. Conforme pode ser observado na Figura 4, a otimização energética conduziu a uma potência para CaC capaz de fornecer parte da energia elétrica e a totalidade da energia térmica requerida para o conjunto de Consumidores. Esta otimização depende fortemente dos preços das tarifas de energia elétrica e de gás, da possibilidade ou não dos consumidores venderem energia para a Concessionária e em caso de venda a que preço. Todas estas variáveis são tratadas pela planilha que, desta forma constitui-se numa ferramenta de avaliação da viabilidade técnica e econômica das CaC.

6.0 - CONCLUSÕES

Em médio prazo, as CaC podem se tornar uma opção economicamente vantajosa para o suprimento combinado de eletricidade e água quente a consumidores residenciais, se as perspectivas de redução de preço se confirmarem. O fato de serem limpas, silenciosas e, potencialmente, capazes de fornecerem energia de alta qualidade, poderá levar a uma aceitação substancial das CaC neste mercado, desde que haja por parte do Consumidor a percepção de ganhos técnicos sem impactos no custo dos serviços de fornecimento de energia.

Este cenário representa uma oportunidade de negócios para as empresas de combustível (principalmente gás natural) e um risco de perda de receita para as empresas de eletricidade que não reestruturarem suas atividades.

A planilha elaborada fornece ferramentas de análise do impacto das diversas variáveis operacionais e de custo, tanto para os Consumidores como para a Concessionária de energia elétrica.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - Haile, S.M., "Fuel cell materials and components" Acta Materialia 51 (2003) 5981-6000.
- 2 - Carrette, L., Friedrich, K.A., Stimming, U., "Fuel Cell-Fundamentals and Applications" Fuel Cell 2001, 1 No. 1.
- 3 - Acres, G.J.K., "Recent advances in fuel cell technology and its applications". Journal of Power Sources 100, 2001, 60-66.
- 4 - Serra, E.T., Furtado, J.G.de M., Soares, G.F.W. e Codeceira Neto, A. Implantação de um Sistema de Célula a Combustível de Membrana Polimérica para Estudos de Geração Distribuída, trabalho aceito para apresentação no XI ERIAC, Ciudad del Este, Paraguai, maio 2005.

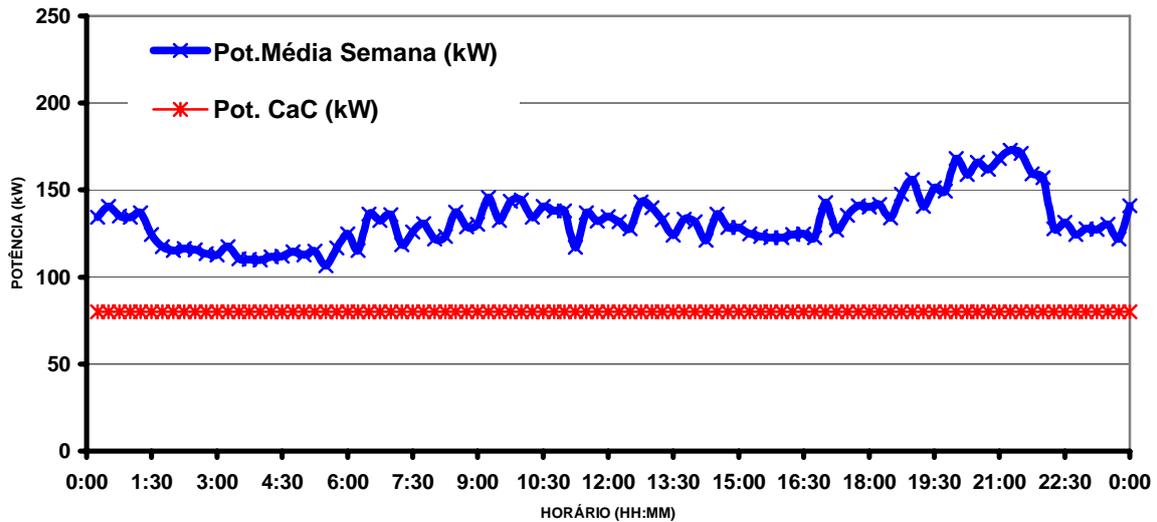


FIGURA 4 – Demanda típica de um prédio residencial de classe média alta com 116 unidades residenciais.

TABELA 2 – Representação Parcial da Planilha de Análise Econômica

BALANÇO ENERGÉTICO E FINANCEIRO DE UMA CÉLULA A COMBUSTÍVEL		
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