

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO**



Alessandro Lama

**Análise de desempenho de uma Célula de
combustível tipo PEM de 5 kW com Reformador
de Gás Natural e Cogeração**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

**Orientadores: Alcir de Faro Orlando
Carlos Eduardo Reuther de Siqueira**

Rio de Janeiro, 11 de Outubro de 2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO**



Alessandro Lama

Análise de desempenho de uma Célula de combustível tipo PEM de 5 kW com Reformador de Gás Natural e Cogeração

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Alcir de Faro Orlando

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC – Rio

Carlos Eduardo Reuther de Siqueira

Orientador

Petrobras

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC – Rio

Prof. Luis Fernando A. Azevedo

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC – Rio

Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC – Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico

Científico – PUC – Rio

Rio de Janeiro, 11 de Outubro de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e dos orientadores.

Alessandro Lama

Graduou-se em Engenharia de Produção Mecânica na Pontifícia Universidade Católica em 2002. Estagiou na Petrobras por 11 meses na área de ciclos de cogeração. Participou do mini-curso Recent on Cooling Technologies for Turbine Blades and Optimization in Gas Turbine da COPPE.

Ficha Catalográfica

<p>Lama, Alessandro</p> <p>Análise de desempenho de uma Célula de combustível tipo PEM de 5 kW com reformador de Gás Natural e Cogeração. / Alessandro Lama; orientador: Alcir de Faro Orlando, co-orientador: Carlos Eduardo Reuther de Siqueira. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2006.</p> <p>121 f. : il. ; 30 cm</p> <p>Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.</p> <p>Inclui referências bibliográficas.</p> <p>1. Engenharia Mecânica - Teses. 2. Célula de combustível. 3. Cogeração. 4. PEM. I. Parise, J.A.R. (José Alberto dos Reis). II. Luis Fernando de Azevedo. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, IV. Título.</p>

CDD: 621

Aos meus pais, família, amigos e
professores pela motivação.

Agradecimentos

Ao Professor Alcir de Faro Orlando, orientador da tese.

Ao orientador Carlos Eduardo Reuther de Siqueira pela ajuda.

À Light, por ter financiado o projeto e permitir a aquisição da célula.

A Deus por iluminar o meu caminho.

Meus agradecimentos especiais aos familiares e amigos que conheci na vida: Angelo Romano, Christian Nunes, Gustavo Ruiz, Silvia S. Oigman, Mao Ilitch, Christiano Reis, Leonor Barroso, Alexandre Travassos e Felipe Ferreira.

Resumo

Lama, Alessandro; Orlando, Alcir de Faro; Siqueira, Carlos Eduardo Reuther. **Análise de desempenho de uma Célula de combustível tipo PEM de 5 kW com reformador de Gás Natural e Cogeração.** Rio de Janeiro, 2006. 121p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Uma célula PEM (membrana de troca de prótons) de 5 kW com reformador foi instalada na PUC-Rio tendo como objetivo a determinação experimental de seu desempenho e de seu potencial de cogeração para aumentar o uso da energia química do combustível. A unidade utiliza um processador de combustível para converter energia do gás natural em um reformado rico em hidrogênio. A célula é totalmente instrumentada fornecendo dados para o cálculo da eficiência global do sistema (eficiência total), eficiência do reformador, eficiência da pilha, eficiência de conversão (DC/AC) e o potencial de cogeração. Este estudo detalha as equações teóricas necessárias para calcular os parâmetros, os conceitos termodinâmicos e eletroquímicos, e experimentalmente, os balanços de massa e energia, comparando os resultados. Foram obtidos dados no regime permanente resultando em eficiências do reformador, da pilha, de conversão e global, junto com os desvios padrões calculados. Também foi comprovado que a energia perdida no reformador e na pilha é praticamente a mesma. Foi mostrado que as degradações de desempenho do reformador e da pilha reduzem a vida útil da célula do conjunto, que também tem uma eficiência abaixo do que foi indicado pelo fabricante. O potencial de aproveitamento da energia química do combustível foi estimado através do cálculo do calor rejeitado pela pilha e através do calor rejeitado pelo reformador dando um valor de 71,3 %.

Palavras-chave

Célula de Combustível; Cogeração e PEM.

Abstract

Lama, Alessandro; Orlando, Alcir de Faro; Siqueira, Carlos Eduardo Reuther. **Performance analysis of the co-generaton potencial of a 5 kW PEMFC**. Rio de janeiro, 2006. 121p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A 5 kW proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) with a reformer has been installed and tested at the Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro (PUC-Rio), Brazil, aiming the experimental determination of its performance and co-generation potential to increase the fuel chemical energy usage. The unit uses a fuel processor to convert energy from natural gas into hydrogen rich reformat. The fuel cell is totally instrumented, supplying data for calculating the overall system efficiency (total efficiency), reformer efficiency, stack efficiency, conversion efficiency (DC/AC), and co-generation potential, at previously set up output powers of 2,5 kW. This study details the equations required for calculating the parameters, both theoretically, from thermodynamics and electrochemics points of view, and experimentally, from mass and energy balances, comparing the results. Steady state data were taken, resulting in reformer, stack, conversion and total average efficiencies, together with the calculated standard deviation. It was also found that the energy loss in the reformer and in the stack are approximately the same. It was also showed that the reformer and stack degradation reduce the system life, which also has an efficiency lower what is stated by the manufacturer. The fuel chemical energy usage potential was estimated by calculating the heat rejected by the stack and the heat rejected in the reformer, giving a value of 71,3%.

Keywords

Fuel Cell; Co-generation and PEM.

Índice

1	Introdução	18
1.1	Apresentação do problema	18
1.2	Revisão da literatura	19
1.2.1	Descrição do estudo feito pelo NIST	19
1.2.2	Descrição do estudo feito pelo FEMP	20
1.2.3	DoD Fuel Cell	20
1.3	Objetivo da dissertação	21
1.4	Descrição dos capítulos	21
2	Fundamentos teóricos	22
2.1	Introdução	22
2.2	Células	22
2.2.1	Estruturas básicas	22
2.2.2	Funções críticas dos componentes das células	24
2.3	Pilha de células de combustível	25
2.3.1	Pilha bipolar	25
2.4	Sistema da célula	26
2.5	Tipos de células	27
2.5.1	Célula de combustível de eletrólito polimérico (PEFC)	29
2.5.2	Célula de combustível alcalina (AFC)	31
2.5.3	Célula de combustível de ácido fosfórico (PAFC)	31
2.5.4	Célula de combustível de carbonato fundido (MCFC)	32
2.5.5	Célula de combustível de óxido sólido (SOFC)	33
2.6	Características	35
2.7	Sistemas de potência auxiliar	36
2.7.1	Configuração de sistema	36
2.8	Geração distribuída	37
2.9	Cogeração	38
2.10	Conclusões	38
2.11	Desempenho da célula	39
2.11.1	O papel da energia livre de Gibbs	39
2.11.2	O desempenho ideal	41
2.11.3	Balanco energético da célula	42
2.11.4	Eficiência da célula	42
2.12	Célula de combustível de eletrólito polimérico	44
2.12.1	Componentes da célula	44
2.12.1.1	Estado da arte dos componentes	47
2.12.1.2	Desempenho	47
2.12.2	Sistema da célula de combustível	48
2.12.2.1	Processos do sistema	48
2.12.2.2	Reforma do combustível	49
2.12.2.3	Considerações Teóricas da Célula de Combustível Tipo PEM	53
2.13	Resultados dos estudos citados no item 1.2	57
2.13.1	Resultados do estudo feito pelo NIST	57
2.13.2	Resultados do estudo feito pelo FEMP	58
3	Métodos Experimentais	61
3.1	Descrição da célula testada	61
3.2	Potencial da Cogeração	65

3.3	Simulação da cogeração	69
3.4	Conversão de combustível	71
3.5	Descrição das grandezas medidas e dos instrumentos	72
3.6	Desempenho	72
3.7	Incerteza de medição	72
4	Resultados experimentais	78
4.1	Célula	78
4.1.1	Poder Calorífico	78
4.1.2	Eficiência térmica global da célula	81
4.1.3	Eficiência térmica	84
4.1.4	Eficiência de conversão	87
4.1.5	Eficiência do reformador	89
4.1.6	Potencial de cogeração	91
4.1.7	Degradação da célula de combustível (2,5 kW)	92
4.1.8	Resultado da incerteza de medição	94
4.1.9	Comparação com outros estudos [31]	95
5	Conclusões	96
6	Referências bibliográficas	99
	Anexos	101

Lista de Figuras

Figura 1: Esquema de uma célula individual	23
Figura 2: Esquema de um CME	26
Figura 3: Processos de uma célula	27
Figura 4: Resumo dos subsistemas e componentes da PEFC	37
Figura 5: Esquema típico de representação de uma pilha	45
Figura 6: Esquema de uma pilha	46
Figura 7: Esquema de uma célula de combustível	47
Figura 8: Esquema da reforma do combustível	50
Figura 9: Módulos de uma célula de combustível	61
Figura 10: Sistema integrado	63
Figura 11: Processador de combustível	63
Figura 12: Geração de eletricidade – usa hidrogênio reformado para produzir eletricidade (corrente DC)	64
Figura 13: Bateria	64
Figura 14: O esquema da cogeração na célula de combustível	65
Figura 15: (a) Caixa d'água; (b) Instalação do hidrômetro	67
Figura 16: (a) Bomba e (b) Entrada e saída da água da cogeração na célula de combustível	67
Figura 17: O radiador como carga térmica	68
Figura 18: O painel de disjuntores para a bomba d'água e para o ventilador do radiador.	68
Figura 19: O sistema de aquisição de dados	68
Figura 20: Gráfico da eficiência elétrica da célula no tempo	84
Figura 21: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (15/12/2005)	104
Figura 22: Aproveitamento da célula em função do tempo (15/12/2005)	104
Figura 23: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (19/12/2005)	108
Figura 24: Aproveitamento da célula em função do tempo (19/12/2005)	108
Figura 25: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (20/12/2005)	109
Figura 26: Aproveitamento da célula em função do tempo (20/12/2005)	109
Figura 27: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (22/12/2005)	110
Figura 28: Aproveitamento da célula em função do tempo (22/12/2005)	110
Figura 29: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (26/12/2005)	111
Figura 30: Aproveitamento da célula em função do tempo (26/12/2005)	111
Figura 31: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (27/12/2005)	112
Figura 32: Aproveitamento da célula em função do tempo	112

(27/12/2005)	
Figura 33: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (28/12/2005)	113
Figura 34: Aproveitamento da célula em função do tempo (28/12/2005)	113
Figura 35: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (29/12/2005)	114
Figura 36: Aproveitamento da célula em função do tempo (29/12/2005)	114
Figura 37: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (02/01/2006)	115
Figura 38: Aproveitamento da célula em função do tempo (02/01/2006)	115
Figura 39: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (03/01/2006)	116
Figura 40: Aproveitamento da célula em função do tempo (03/01/2006)	116
Figura 41: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (04/01/2006)	117
Figura 42: Aproveitamento da célula em função do tempo (04/01/2006)	117

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Resumo dos diferentes tipos de célula	29
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens das pilhas de combustível em cogeração	35
Tabela 3 - Resumo dos impactos causados pelos constituintes do combustível	36
Tabela 4 - Eficiências dos sistemas de geração distribuída	38
Tabela 5 - Tensão ideal em função da temperatura da célula	41
Tabela 6 - Informações Gerais	62
Tabela 7 - PCS e PCI do gás, à 20 °C e 1 atm, obtidos em novembro de 2004	79
Tabela 8 - PCS e PCI do gás, à 20 °C e 1 atm, obtidos em dezembro de 2004	79
Tabela 9 - PCS e PCI do gás, à 20 °C e 1 atm, obtidos em dezembro de 2005	80
Tabela 10 - PCS e PCI do gás, à 20 °C e 1 atm, obtidos em janeiro de 2006	80
Tabela 11 - Eficiência térmica global da célula (η_G) para 2,5 kW em novembro de 2004	81
Tabela 12 - Eficiência térmica global da célula (η_G) para 2,5 kW em dezembro de 2004	82
Tabela 13 - Eficiência térmica global da célula (η_G) para 2,5 kW em dezembro de 2005	82
Tabela 14 - Eficiência térmica global da célula (η_G) para 2,5 kW em janeiro de 2006	83
Tabela 15 - Eficiência térmica da pilha (η_T) em novembro de 2004	85
Tabela 16 - Eficiência térmica da pilha (η_T) em dezembro de 2004	85
Tabela 17 - Eficiência térmica da pilha (η_T) em dezembro de 2005	86
Tabela 18 - Eficiência térmica da pilha (η_T) em janeiro de 2006	86
Tabela 19 - Eficiência de conversão (η_{CE}) em novembro de 2004	87
Tabela 20 - Eficiência de conversão (η_{CE}) em dezembro de 2004	87
Tabela 21 - Eficiência de conversão (η_{CE}) em dezembro de 2005	88
Tabela 22 - Eficiência de conversão (η_{CE})	88
Tabela 23 - Eficiência do Reformador (η_R) em novembro de 2004	89
Tabela 24 - Eficiência do Reformador (η_R) em dezembro de 2004	89
Tabela 25 - Eficiência do Reformador (η_R) em dezembro de 2005	90
Tabela 26 - Eficiência do Reformador (η_R) em janeiro de 2006	90
Tabela 27 - Potencial de cogeração	91
Tabela 28 - Potencial de cogeração medido em março de 2003	91
Tabela 29 - Informações gerais	92
Tabela 30 - Comparação de desempenho ao longo do tempo	92
Tabela 31 - Comparação de desempenho ao longo do tempo	93
Tabela 32 - Resultado de incerteza de medição	94
Tabela 33 - Comparação com outros estudos	95
Tabela 34 - Comparação com outros estudos	95
Tabela 35 - Comparação com outros estudos	95
Tabela 36 - Composição do gás natural da CEG de dezembro de	102

2005

Tabela 37 - Composição do gás natural da CEG de janeiro de 2006	102
Tabela 38 - Resultados referentes à água	105
Tabela 39 - Resultados referentes ao óleo	106
Tabela 40 - Resultados referentes ao trocador de calor	107

*Experiência é o nome que
muita gente dá a seus
erros.*

Oscar Wilde

Nomeclatura

a, constantes empíricas.

b, constantes empíricas.

c, constantes empíricas.

c_p , calor específico, kJ/kg °C.

c_{pa} , calor específico da água, kJ/kg °C.

c_{po} , calor específico do óleo térmico, kJ/kg °C.

c_{pp} , calor específico do propileno glicol, kJ/kg °C.

E , potência ideal da célula, kW.

E_{DC} , energia de saída DC, kW.

E_{H_2} , energia química do hidrogênio, kJ.

E_{out} , potência elétrica de saída menos a carga auxiliar, kW.

E_{Trev} , tensão reversível teórica, V.

F, constante de Faraday - 96500 C/(mol e⁻).

G_i , quantidade molar parcial da energia livre de Gibbs.

h_i , entalpia do elemento i, kJ/kg.

h_i° , entalpia inicial do elemento i, kJ/kg.

\dot{m}_a , vazão mássica da água de cogeração, kg/s.

$\dot{m}_{H_2, u}$, hidrogênio que entra na pilha, kg/s.

$\dot{m}_{H_2, R}$, quantidade de hidrogênio gerada no processo de reforma, kg/s.

\dot{m}_{gas} , quantidade de gás natural que entra no reformador, kg/s.

\dot{m}_o , vazão mássica do óleo térmico, kg/s.

\dot{m}_p , vazão mássica do propileno glicol, kg/s.

\dot{m}_{wH} , vazão mássica da água no umidificador, kg/s.

n, número de elétrons participando da reação.

n_i , número de moles do elemento i .

PCI, poder calorífico inferior, kJ/kmol.

PCS, poder calorífico superior, kJ/kmol.

Q_{rej} , parcela de calor liberada pelo reformador, kJ.

Q_{st} , parcela de calor liberada ao óleo térmico pela pilha, kJ.

s_i , entropia do elemento i , kJ/kg °C.

s_i° , entropia final do elemento i , kJ/kg °C.

T , temperatura do sistema, °C.

V , tensão, V.

V_{exit} , tensão de saída, V.

W_{el} , potência elétrica, kW.

W^{rev} , potência reversível, kW.

Símbolos gregos

ΔG , variação da energia livre de Gibbs, kJ/mol.

Δh , variação de entalpia, kJ/kg.

Δs , variação de entropia, kJ/kg °C.

η , eficiência, %.

η_{aux} , percentual da energia química do gás perdida com a conversão DC/AC e auxiliares, %.

η_{cog} , porcentagem da energia química do gás que pode ser usada em cogeração, %.

η_{CE} , eficiência de conversão, %.

η_G , eficiência térmica global da célula, %.

$\eta_{G, SARC}$, eficiência média global calculada pelo SARC, %.

η_{pilha} , porcentagem da energia química do gás rejeitada pela pilha em forma de calor, %.

η_{TH} , eficiência térmica de pilha teórica, %.

η_R , eficiência do reformador, %.

η_{ref} , percentagem da energia química do gás rejeitada pelo reformador como calor, %.

ϵ_{HX1} , efetividade do trocador de calor 1.

ϵ_{HX2} , efetividade do trocador de calor 2.

ϵ_{HX3} , efetividade do trocador de calor 3.

Índices

a, componente.

b, componente.

c, componente.

d, componente.

i, componente

in, entra.

out, sai.

1

Introdução

1.1

Apresentação do problema

As células de combustível são dispositivos eletroquímicos que aproveitam a energia química do combustível, gerando diretamente energia elétrica.

O aumento do interesse em células de combustível de baixa potência para fornecimento de energia elétrica foi intensificado com o crescimento da disponibilidade de gás natural no Brasil, quer seja importado ou produzido pelo Brasil. A energia elétrica gerada e consumida localmente e que não é fornecida pela rede elétrica é chamada de geração de energia elétrica distribuída (DG). Isto elimina a necessidade de longas linhas de transmissão e o investimento associado à rede elétrica para aumentar o fornecimento de energia. Com isso, a companhia de gás se beneficia do desenvolvimento deste mercado.

Com a cogeração, que é a geração de energia térmica e elétrica simultaneamente a partir de um mesmo combustível, o calor rejeitado pela célula é usado para fornecer energia térmica para aplicações de aquecimento e resfriamento.

Existem cinco tipos de células de combustível. Suas distinções básicas são o tipo de eletrólito utilizado. A célula de combustível desse estudo é a PEM, célula que utiliza um polímero de troca de prótons como eletrólito. Em um outro nível de classificação, as células de combustível podem também ser classificadas quanto ao tipo de oxidação, que pode ser direta ou indireta. A oxidação indireta é a que utiliza um reformador, equipamento que extrai o hidrogênio contido no combustível para utilização na célula. Já a de oxidação direta não possui essa etapa intermediária, sendo o combustível inserido na própria célula para reação.

Neste estudo, o desempenho e o potencial de cogeração de uma célula PEM de 5 kW são analisados para uma avaliação de tecnologia.

As células de combustível têm sido estudadas para uma produção de energia elétrica com uma alta eficiência e uma baixa poluição ambiental, usando hidrogênio e oxigênio em uma reação química de oxidação parcial catalítica. Uma das primeiras células a ser desenvolvida foi a de óxido sólido em 1937. As células alcalinas e de carbonato fundido vieram em 1946. Depois vieram as células de polímero sólido em 1960 e de metanol. A única célula comercialmente

disponível nos dias de hoje é a de ácido fosfórico, desenvolvida em 1967. Contudo, as mais recentes PEMs são mais simples e mais compactas do que os outros tipos [16] , tendo um bom potencial para ser utilizada em veículos, têm recebido grandes investimentos de pesquisadores para reduzir seus custos, suas emissões atmosféricas, aumentar suas durabilidades e suas potências específicas para veículo (W.h/kg). Essas ações aumentaram o potencial utilizando-se PEMs de baixa potência para aplicações estacionárias.

As células de combustível de baixa potência, em torno de 5 kW a 10 kW, estão sendo desenvolvidas para aplicações residenciais, ainda não são economicamente viáveis. A maioria delas não tem reformador e produzem energia elétrica diretamente do hidrogênio que é caro. Contudo, grandes pesquisas têm sido feitas para desenvolver os reformadores de gás natural com o objetivo de aumentar sua eficiência e sua capacidade de produzir hidrogênio e reduzir o custo de operação [21].

Esse estudo apresentará a análise de desempenho de uma célula tipo PEM de 5 kW, produzida pela Plug Power nos Estados Unidos. A unidade é alimentada com gás natural, sendo hidrogênio produzido no reformador. O potencial de utilização da cogeração será analisado. Essa célula está sendo testada em quatro países: Alemanha, Brasil, EUA e Japão.

Tecnicamente é possível se obter uma célula do tipo PEM de oxidação indireta, ou seja, com reformador, operando com 90% de eficiência teórica. Entretanto esse valor, devido à eficiência eletroquímica e do reformador, deve atingir, na prática, no mínimo 50%. Ela configura uma possibilidade que não deve ser descartada. Devido à dificuldade de se fazer um reformador mais compacto com alta eficiência, o que é fundamental para aplicações automotivas, a eficiência global da célula acaba se reduzindo.

1.2 Revisão da literatura

1.2.1 Descrição do estudo feito pelo NIST

Vários testes foram feitos pelo Nist (National Institute for Standards and Technology) [5] para determinar os efeitos de operação no desempenho da mesma célula.

As eficiências elétricas obtidas variaram de 16,4% a 20,7% e são consideravelmente menores do que a eficiência elétrica típica da célula PEM (25 a 40%). A eficiência térmica variou de 10% a 47,9%.

1.2.2

Descrição do estudo feito pelo FEMP (Federal Energy Management Program) [10]

Neste estudo foi concluído que a eficiência global da conversão do gás natural em eletricidade sem recuperação de calor foi menor que 30%. Com a recuperação de calor, a eficiência global máxima para a unidade (total de calor mais eletricidade) foi em torno de 65%.

1.2.3

DoD (Department of Defense) Fuel Cell [26]

Neste centro de pesquisa foram emitidos vários relatórios que serviram de comparação com este estudo, pois foram utilizadas células de combustível idênticas operando com uma potência de 2,5 kW.

Num relatório chamado *Final Project Report – FY02 PEM Fuel Cell Demonstration* foram encontradas as seguintes informações: eficiência elétrica 27,91%, uma eficiência térmica de 15,09% e uma eficiência de aproveitamento de 15,09% (Maio de 2003); eficiência elétrica 28,20%, uma eficiência térmica de 37,27% e uma eficiência de aproveitamento de 65,47% (Setembro de 2003); eficiência elétrica 27,20%, uma eficiência térmica de 17,61% e uma eficiência de aproveitamento de 44,81% (Outubro de 2003); eficiência elétrica 25,57%, uma eficiência térmica de 16,65% e uma eficiência de aproveitamento de 42,22% (Novembro de 2003).

Em um outro relatório chamado *Ft Belvoir, VA PEM Demonstration Project* foram encontradas as seguintes informações: eficiência elétrica 26,71%, uma eficiência térmica de 17,63% e uma eficiência de aproveitamento de 44,33% (Março de 2005); eficiência elétrica 26,65%, uma eficiência térmica de 16,69% e uma eficiência de aproveitamento de 43,34% (Abril de 2005).

Em um outro relatório chamado *Midpoint Project Status Report* foram encontradas as seguintes informações: eficiência elétrica 26,07%, uma eficiência térmica de 24,04% e uma eficiência de aproveitamento de 50,11% (Dezembro de 2004).

Em um outro relatório chamado *Initial Project Description Report* foram encontradas as seguintes informações: a eficiência do sistema irá variar de acordo com a temperatura da cogeração externa e a vazão, a eficiência de aproveitamento deve ficar em torno de 60%, a energia térmica gerada mínima deve ser de 3,27 kW e a eficiência elétrica deve ficar em torno de 26%. Segundo este relatório é necessário ter uma vazão mínima de 70 slm (litros por minuto) de gás natural, o que não aconteceu no nosso estudo. O gás natural deve conter mais que 90% de metano e enxofre não mais que 15 ppm nas bases médias anuais.

1.3

Objetivo da dissertação

Este estudo foi desenvolvido com o objetivo de acelerar a comercialização das células de combustível residenciais, fornecendo para os consumidores informações sobre os benefícios das células, desempenho global e o desempenho do sistema elétrico e térmico. Para quantificar esses resultados foram utilizados os dados fornecidos pela célula que é devidamente instrumentada. Com isso, foram medidas a energia do combustível fornecido ao sistema e a energia térmica e elétrica de saída.

Foram realizados testes para determinar o desempenho da célula e suas eficiências elétrica e térmica. Com esses resultados foi possível avaliar a vida útil de seus componentes.

1.4

Descrição dos capítulos

Esta dissertação se divide em três partes. A primeira descreve os cinco maiores tipos de célula de combustível e seus desempenhos. A segunda parte mostra como será realizada a aquisição dos dados. A terceira é o estudo da eficiência de uma célula tipo PEM. Este estudo é feito através da análise termodinâmica das reações da célula.

2

Fundamentos teóricos

Este capítulo fornecerá um resumo da tecnologia das células de combustível. Primeiramente serão abordados os funcionamentos básicos das células e os seus componentes básicos. Em seguida, será apresentado um resumo dos principais tipos de célula, suas características e a importância do seu desenvolvimento. Por último, serão revisadas as aplicações.

2.1

Introdução

As células de combustível são dispositivos eletroquímicos que convertem energia química em energia elétrica diretamente, produzindo-a com baixo impacto ambiental. Como os passos intermediários do fornecimento de calor e sua transformação em trabalho mecânico, típico dos métodos convencionais, são evitados, estas células não possuem as limitações termodinâmicas das máquinas térmicas. E devido à ausência da combustão, as células produzem eletricidade com o mínimo de poluição. Contudo, diferentemente das baterias, o redutor e o oxidante nas células devem ser constantemente alimentados para permitir uma operação contínua.

Embora as células pudessem, em princípio, processar uma grande quantidade de combustíveis e oxidantes, os mais utilizados são os combustíveis comuns (gás natural, hidrogênio e GLP) ou hidrogênio como um redutor e ar ambiente como oxidante.

2.2

Células

2.2.1

Estruturas básicas

Os conjuntos membrana eletrodo - CMEs formam o coração das células. Estes dispositivos convertem a energia química contida em um combustível em energia elétrica. A estrutura física básica de uma célula consiste de uma membrana eletrolítica em contato com um anodo e um catodo de cada lado. Uma representação esquemática de um CME com o reagente/gás e o direcionamento do íon é mostrada na Fig. 1.

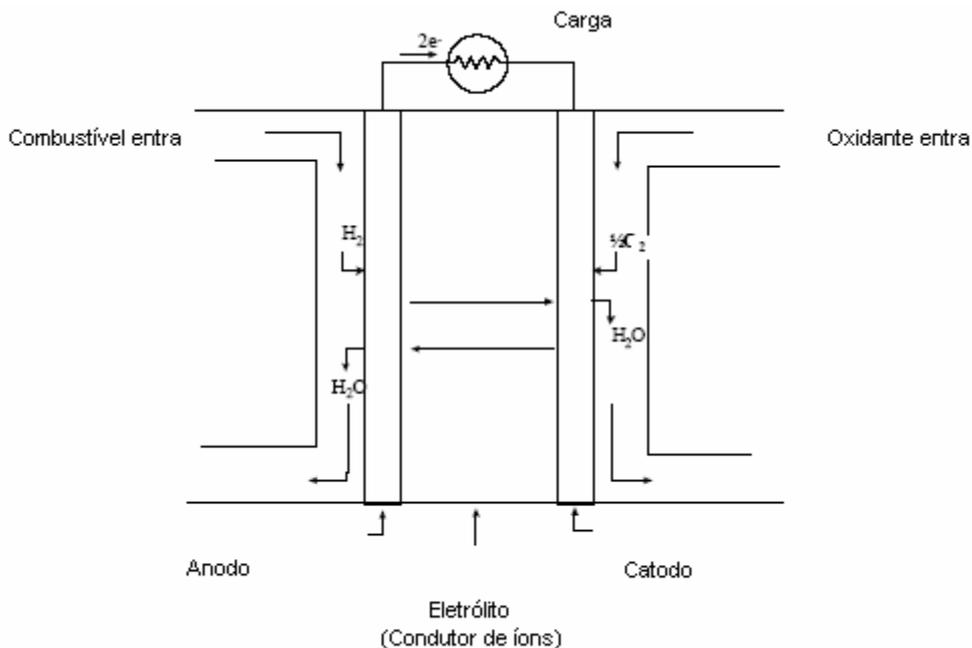


Figura 1: Esquema de uma célula individual.

Em uma célula típica, o combustível é alimentado continuamente para o anodo (eletrodo negativo) e um oxidante (geralmente oxigênio do ar) é alimentado continuamente para o catodo (eletrodo positivo). As reações eletroquímicas são realizadas nos eletrodos para produzir corrente elétrica passando pelo eletrólito. Existem muitas diferenças entre as células e as baterias. A bateria é um dispositivo que armazena energia, no qual toda a energia disponível é armazenada. A bateria terminará de armazenar energia elétrica quando os reagentes químicos forem consumidos (isto é, descarregando-se com o tempo). A célula, de outra forma, é um dispositivo de conversão de energia para a qual combustível e oxidante são fornecidos continuamente. Em princípio, a célula produz eletricidade de acordo com a quantidade de combustível que é fornecido.

As células são classificadas de acordo com a escolha do eletrólito e do combustível, os quais determinam as reações no eletrodo e os tipos de íons que carregam a corrente que atravessa o eletrólito. Appleby e Foulkes [1] notaram que, em teoria, qualquer substância capaz de ser oxidada quimicamente e de ser fornecida continuamente (como um fluido) pode ser queimada galvanicamente como combustível no anodo de uma célula. Similarmente, o oxidante pode ser qualquer fluido que possa ser reduzido a uma taxa suficiente. Embora, o uso direto de um combustível convencional nas células deve ser priorizado, a maioria das células em desenvolvimento atualmente usa hidrogênio ou um gás rico em

hidrogênio como combustível. O hidrogênio possui um papel importante nas reações que ocorrem no anodo podendo ser retirado de uma grande variedade de combustíveis fósseis e através de eletrólise. Por razões simples, a maioria dos oxidantes é oxigênio, o qual pode ser encontrado no ar.

2.2.2

Funções críticas dos componentes das células

A parte crítica da maioria das células está relacionada com as lâminas difusoras. Estas regiões, onde ocorrem às reações eletroquímicas, são as regiões de encontro dos eletrodos com os eletrólitos. Para uma região estar ativa, ela deve ser exposta ao reagente, estar em contato elétrico com o eletrodo, estar em contato iônico com o eletrólito e conter uma eletro-catálise suficiente para reagir e continuar a uma taxa desejada. A densidade dessas regiões e a natureza dessas lâminas exercem um papel crítico no desempenho eletroquímica dos eletrólitos das células.

Em células com eletrólito líquido, os gases reagentes passam através de eletrólito fino que umidifica as porções dos eletrodos e reage eletroquimicamente em suas superfícies. Se o eletrodo contém uma quantidade excessiva de eletrólito, o eletrodo pode “inundar” e restringir o transporte de substâncias gasosas do eletrólito para as reações. A consequência é uma redução do desempenho eletroquímico do eletrodo. Contudo, um balanço deve ser realizado entre os eletrodos, eletrólitos e as fases gasosas da estrutura porosa do eletrodo.

Com o passar dos anos, o desempenho das células tem melhorado. Estas melhoras resultam do desenvolvimento das lâminas difusoras, reduzindo a espessura do eletrólito e dos materiais do eletrodo e do eletrólito, aumentando a variação da temperatura em que as células podem ser operadas.

E para facilitar as reações eletroquímicas, cada componente da célula terá outras funções críticas. O eletrólito não transportará somente reagentes dissolvidos para o eletrodo, mas também conduzirá cargas iônicas entre os eletrodos e com isso completará o circuito elétrico da célula como mostrado na Fig.1. Isso também cria uma barreira física para prevenir uma mistura entre o combustível e o oxidante.

As funções dos eletrodos porosos em células de combustível, além de fornecerem um ambiente para as reações eletroquímicas, possuem as seguintes funções:

- Conduzir elétrons para fora ou para dentro das lâminas difusoras (um eletrodo deve ser feito de materiais que tenham boa condutividade elétrica), servir como armazenamento de corrente e conectar-se com outras células ou cargas.
- Garantir que os gases reagentes sejam distribuídos uniformemente pela célula.
- Garantir que os produtos da reação sejam eficientemente encaminhados para a fase gasosa.

Como consequência, os eletrodos são tipicamente porosos e feitos de um material eletricamente condutor. À baixa temperatura, somente alguns e caros materiais possuem uma atividade eletro-catalítica suficiente, e então esses catalisadores são depositados em pequenas quantidades nas lâminas onde são necessários. Em células de alta temperatura, a atividade eletro-catalítica dos eletrodos é suficiente.

Embora uma grande variedade de geometria tem sido considerada, a maior parte das células em desenvolvimento possui geometria plana (retangular ou circular) ou tubular (com terminação única ou dupla e cilíndrica ou plana).

2.3 Pilha de células de combustível

Para a maioria das células, os CMEs devem ser combinados de uma maneira modular com o a pilha para alcançar a tensão e a potência de saída requerida para as aplicações. Geralmente, a pilha envolve CMEs múltiplos conectados em série via condutores interconectados eletricamente. O arranjo bipolar será descrito a seguir.

2.3.1 Pilha bipolar

A pilha mais comum possui arranjo bipolar (Fig. 2). Os CMEs são conectados eletricamente com interconectores. Devido à configuração de um CME com placa plana, os interconectores se tornaram placas separadoras com duas funções:

- Fornecer uma conexão elétrica entre unidades adjacentes, especificamente para os CMEs de placa plana e

- Fornecer uma barreira que separa o combustível do oxidante dos respectivos CMEs.

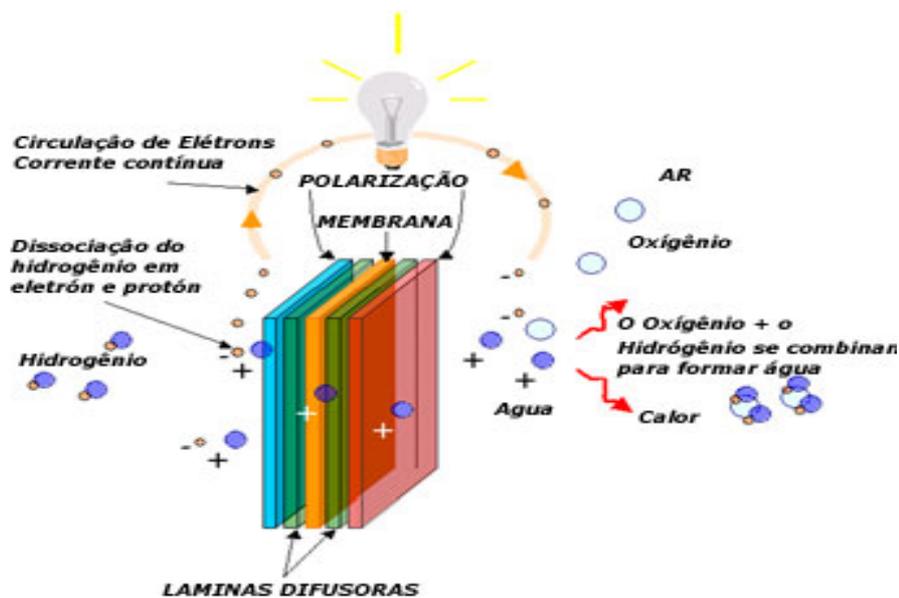


Figura 2: Esquema de um CME.

Em muitos arranjos desse tipo, os interconectores também incluem canais que distribuem a vazão de gás ao longo dos CMEs. Esse tipo de arranjo é eletricamente simples e ajuda a encurtar os caminhos das correntes elétricas (o que ajuda a minimizar a resistência da célula).

2.4 Sistema da célula

Com relação à pilha, o sistema requer vários outros subsistemas e componentes; chamado de sistema de controle. Junto com a pilha, esse sistema forma o sistema da célula. A precisão do arranjo depende principalmente do tipo de célula, o tipo de combustível e a aplicação. Com isso, as condições de operação do projeto dos CMEs e da pilha determinam as características do sistema de controle. A maioria dos sistemas das células contém:

- Preparação do combustível: somente quando combustível puro (como hidrogênio puro) não é usado, é necessária a preparação do mesmo, envolvendo a retirada de impurezas e condicionamento térmico. Com isso, como muitas células utilizam outros tipos de combustível, estas necessitarão de um processador, como um reformador, no qual o combustível reage com algum oxidante

(usualmente vapor ou ar) se transformando numa mistura rica em hidrogênio que alimenta o anodo.

- Fornecimento de ar: na maioria dos casos, são incluídos compressores de ar ou assopradores com filtros de ar.
- Controle térmico: todos os sistemas necessitam de um controle rigoroso da temperatura da pilha.
- Controle da água: a água é necessária em algumas partes da célula, mesmo sendo um produto de reação.
- Equipamento de potência elétrica: como a pilha produz corrente contínua que não é possível consumir diretamente, inversores de corrente são necessários.

Embora não seja o ponto mais importante no desenvolvimento da célula, o sistema de controle representa uma fração significativa do peso, volume, e do custo do sistema. A Fig. 3 mostra uma simples descrição da planta da célula. Começando com processador de combustível, onde o combustível convencional (gás natural, outros hidrocarbonetos gasosos, metanol, nafta ou carvão) é purificado, depois convertido em hidrogênio. A conversão de energia ocorre quando a corrente DC é gerada pela pilha. A variedade do número de CMEs depende do tipo da aplicação. Finalmente, o inversor converte a corrente elétrica DC em AC para o uso do consumidor.

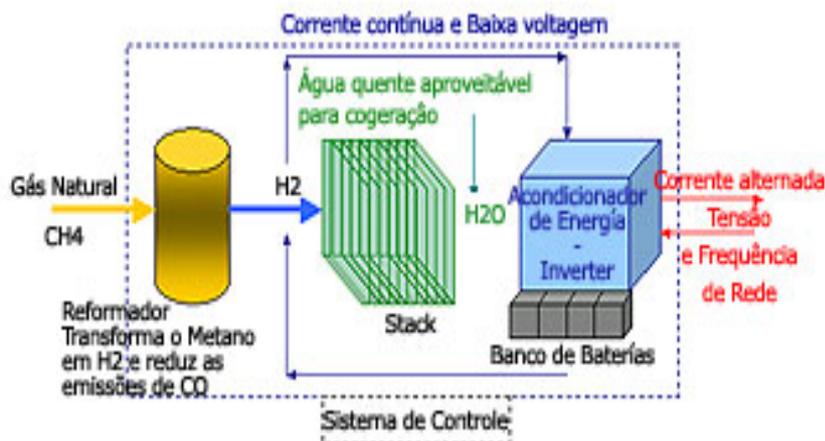


Figura 3: Processos de uma célula.

2.5 Tipos de células

Várias células estão em diferentes fases de desenvolvimento. Os tipos de células mais comuns são as com eletrólito e incluem:

- 1) células de combustível com eletrólito polimérico (PEFC);
- 2) célula de combustível alcalina (AFC);
- 3) células de combustível de ácido fosfórico (PAFC);
- 4) célula de combustível de carbonato fundido (MCFC); e
- 5) célula de combustível de óxido sólido (SOFC).

Em geral, a escolha do eletrólito determina o limite da temperatura de operação da célula. A temperatura de operação e a vida útil da célula determinam as propriedades físicoquímica e termomecânica dos materiais usados nos componentes das células (isto é, eletrodos, eletrólitos, interconectores, coletores de corrente, etc.). Os eletrólitos aquosos funcionam em torno de 200°C ou um pouco abaixo devido à alta pressão de vapor e degradação rápida à temperatura elevada. A temperatura de operação também possui um papel importante, determinando o grau necessário de reforma do gás. Em células de baixa temperatura, todos os combustíveis devem ser primeiramente transformados em hidrogênio antes de entrar na pilha. Além disso, a catálise do anodo a baixa temperatura (principalmente os de platina) é fortemente envenenada por CO. Em células de alta temperatura, CO e também CH₄ podem ser convertidos em hidrogênio ou até mesmo serem oxidados diretamente. A Tab. 1 fornece uma visão geral das características chaves dos principais tipos de célula.

Tabela 1: Resumo dos diferentes tipos de célula

	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Eletrólito	Membrana de troca de íon polimérico	Hidróxido de potássio	Ácido fosfórico líquido em SiC	Carbonato fundido líquido em LiAlO_2	Cerâmica
Eletrodos	Carbono	Metais de transição	Carbono	Níquel e Óxido Níquel	Metal
Catalisador	Platina	Platina	Platina	Material do eletrodo	Material do eletrodo
Interconectores	Carbono ou metal	Metal	Grafite	Aço inoxidável ou Níquel	Níquel, cerâmica ou aço
Temperatura de operação	40 – 80°C	65°C – 220°C	205°C	605°C	600-1000°C
Portadores de carga	H^+	OH^-	H^+	CO_3^-	O^-
Reformadores	Sim	Sim	Sim	Não, só para alguns combustíveis.	Não, só para alguns combustíveis
Conversores de CO para hidrogênio	Sim, mais purificação para remover rastros de CO	Sim, mais purificação para remover rastros de CO e CO_2	Sim	Não	Não
Componentes das células primárias	Baseada em carbono	Baseada em carbono	Baseada em grafite	Baseada em aço inoxidável	Cerâmica
Controle da água produzida	Evaporação	Evaporação	Evaporação	Produtos gasosos	Produtos gasosos
Controle do calor produzido	Processamento do gás + Trocadores	Processamento do gás + Circulação do eletrólito	Processamento do gás + Trocadores ou geração de vapor	Reforma interna + Processamento do gás	Reforma interna + Processamento do gás

2.5.1

Célula de combustível de eletrólito polimérico (PEFC)

As células de combustível de eletrólito polimérico (PEFC) possuem como eletrólito membranas para a troca de íons (polímeros) que são excelentes condutores elétricos. O único líquido presente nesse tipo de célula é a água; contudo, os problemas com corrosão são mínimos. Tipicamente, eletrodos de carbono com catalisador de platina são usados em anodos e catodos e com interconectores de metal.

O controle de água na membrana é importante para um bom desempenho. A célula deve operar abaixo das condições máximas para que a água não evapore mais rápido do que é produzida, pois a membrana deve ficar hidratada. Por causa da limitação da temperatura de operação imposta pelo polímero, geralmente menos de 100°C, deve-se operar entre 60 e 80°C e devido a problemas com controle de água, um gás rico em H_2 com mínimo ou nenhum CO (um veneno a baixa temperatura) é usado. O uso de um catalisador mais

forte (Pt na maioria das vezes) que é usado em PAFCs é necessário para os anodos e os catodos. Um processador de combustível mais abrangente é necessário para outros tipos de combustíveis, porque o anodo é facilmente envenenado pelo mesmo nível de CO, substâncias sulfurosas e halogênios.

As PEFCs estão sendo utilizadas para uma grande quantidade de aplicações, especialmente para veículos movidos a célula de combustível (FCVs). Como consequência de um grande interesse em FCVs e hidrogênio, os investimentos em células PEFCs no ano passado superaram todos os investimentos referentes aos outros tipos de célula. Embora significativo desenvolvimento de PEFCs para aplicações estacionárias tem sido realizadas, muitos pesquisadores estão agora focando aplicações automotivas e portáteis.

Vantagens: PEFC possui um eletrólito sólido que fornece uma excelente resistência para a passagem do gás. Funciona com uma temperatura de operação baixa, permitindo uma rápida partida e com a ausência de elementos corrosivos, não sendo necessária a utilização de materiais mais inoxidáveis na construção da pilha nem do sistema de controle. Resultados de testes têm demonstrado que as PEFCs são capazes de produzir densidades de correntes altas acima de 2 kW/l e 2 W/cm². Isto só ocorre quando hidrogênio é usado como combustível.

Desvantagens: A temperatura de operação baixa dificulta o controle térmico, especialmente em densidades de correntes altas e dificulta o uso do calor rejeitado para cogeração. Como o controle de água é outro desafio significativo no projeto de PEFC, os engenheiros devem balancear a célula garantindo hidratação suficiente do eletrólito contra sua inundação. Com isso, PEFCs são muito sensíveis a envenenamento por níveis contaminantes de CO, elementos sulfurosos e amônia. Parcialmente, algumas dessas desvantagens podem ser reduzidas diminuindo a densidade de corrente e aumentando a carga dos catalisadores do eletrodo, porém ambos aumentam o custo do sistema. Se combustíveis com hidrocarbonetos são usados, grandes processadores de combustível serão necessários impactando negativamente no tamanho do sistema, na complexidade, na eficiência e no custo do sistema. Finalmente, em PEFC de hidrogênio, a necessidade de desenvolver uma infra-estrutura de hidrogênio impõe barreiras para a comercialização.

2.5.2 Célula de combustível alcalina (AFC)

O eletrólito neste tipo de célula possui uma concentração de (85%) KOH para operação com alta temperatura (250°C) ou possui uma menor concentração de (35 a 50%) KOH para temperatura de operação mais baixa (120°C). O eletrólito é mantido em uma matriz e uma grande variedade de catalisadores pode ser usada (Ni, Ag, óxidos de metais e metais nobres). O fornecimento de combustível é limitado a componentes não-reativos com exceção do hidrogênio. CO é um veneno, e CO₂ reagirá com o KOH para formar o K₂CO₃. Mesmo uma pequena quantidade de CO₂ no ar, deve ser considerada um veneno potencial para a célula alcalina. Geralmente, o hidrogênio é considerado o melhor combustível para AFC, embora algumas células usem eletrólitos alcalinos diferentes.

A AFC foi uma das primeiras células a serem desenvolvidas, a partir de 1960. A aplicação para aquela época foi fornecer eletricidade para o veículo espacial Apollo. A AFC tem sido utilizada em aplicações espaciais com um sucesso considerável, porém em aplicações terrestres tem tido desafios devido à sensibilidade ao CO₂. Embora alguns pesquisadores dos EUA e da Europa tentem utilizá-la em aplicações móveis e em sistemas fechados (células reversíveis).

Vantagens: Excelente desempenho com hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂) comparada com outros tipos de célula característica do movimento do O₂ no eletrodo e sua facilidade em utilizar uma grande variedade de catalisadores.

Desvantagens: A sensibilidade do eletrólito ao CO₂ requer uma pureza maior do H₂ como combustível. Como consequência, o uso de um reformador necessitará de uma alta eficiência no sistema de remoção do CO e do CO₂. Com isso, se o ar for utilizado como oxidante, o CO₂ do ar deve ser removido. Mesmo que isso não seja um grande desafio técnico, possui um impacto significativo no tamanho e no custo do sistema.

2.5.3. Célula de combustível de ácido fosfórico (PAFC)

O ácido fosfórico, em uma concentração de 100%, é usado como eletrólito nesse tipo de célula, a qual opera entre 150 e 220°C. À baixas temperaturas, ácido fosfórico é um pobre condutor de íons e o envenenamento do catalisador Pt pelo CO no anodo se torna severo. A relativa estabilidade da concentração de

ácido fosfórico é alta se comparada com outros ácidos comuns; conseqüentemente a PAFC é capaz de operar a uma alta temperatura (100 a 220°C). Com isso, o uso do ácido concentrado (100%) minimiza a pressão de vapor da água sem dificultar o controle da água dentro da célula. A matriz mais comum usada para reter o ácido é à base de silicone [1] e o catalisador em ambos os anodos e catodos é a Pt.

As PAFCs são desenvolvidas mais para aplicações estacionárias. Tanto nos EUA quanto no Japão, centenas de sistemas PAFC são produzidos, vendidos e usados em testes de campo e apresentações. Esta é um dos poucos tipos de células que estão disponíveis no mercado. O desenvolvimento da PAFC tem diminuído nos últimos dez anos, devido ao fato de a PEFC ter um melhor custo. Contudo, o desenvolvimento continua.

Vantagens: PAFCs são muito menos sensíveis a CO do que PEFCs e AFCs: a PAFC tolera aproximadamente 1% de CO como um diluente. A temperatura de operação é baixa o suficiente para permitir o uso de materiais de construção comuns, pelo menos nos componentes do sistema de controle. A temperatura de operação também fornece uma considerável flexibilidade de projeto do controle térmico. A PAFC tem demonstrado uma eficiência de 37 a 42% (baseada no PCI do gás), a qual é muito mais alta que a eficiência da PEFC pode alcançar (porém menor que a eficiência da SOFC e MCFC). Com isso, o calor trocado da PAFC pode ser prontamente utilizado nas aplicações comerciais e de cogeração.

Desvantagens: A redução do oxigênio no catodo é menor que na AFC e requer o uso de catalisadores de platina. Embora menos complexa que PEFC, PAFCs ainda requerem grandes processadores de combustível, incluindo um trocador de calor para alcançar bom desempenho. Finalmente, a natureza corrosiva do ácido fosfórico requer o uso de materiais caros na pilha (inclusive placas separadoras de grafite).

2.5.4

Célula de combustível de carbonato fundido (MCFC)

O eletrólito nesta célula é usualmente uma combinação de carbonatos alcalinos, o qual é localizado numa matriz cerâmica de LiAlO_2 . A célula opera entre 600 e 700°C onde os carbonatos alcalinos formam sais fundidos altamente condutores, com íons de carbonatos fornecendo conduções iônicas. Em alta temperatura de operação nas MCFCs, Ni (anodo) e óxido de níquel (catodo) são

adequados a promover reações. Metais nobres não são necessários para a operação e a maioria dos combustíveis pode ser reformada internamente.

O foco do desenvolvimento da MCFC tem sido mais em aplicações estacionárias e marítimas, onde o grande tamanho e o peso da MCFC e o tempo da partida lenta não são importantes. As MCFC estão em desenvolvimento para o uso com uma grande variedade de combustíveis convencionais e renováveis. As tecnologias da MCFC também são usadas para a DCFC. Além das PAFCs, as MCFCs têm sido usadas em aplicações estacionárias, com dezenas de projetos em andamento ou terminados. Embora o número de pesquisadores e de investimentos foi reduzido comparado com a década passada, desenvolvimentos e pesquisas estão em andamento.

Vantagens: A alta temperatura de operação da MCFC (650°C) resulta em vários benefícios: não são necessários catalisadores caros, pois os eletrodos de níquel fornecem reações suficientes e como CO e determinados hidrocarbonetos são combustíveis para a MCFC, eles são convertidos para hidrogênio na pilha (em placas especiais do reformador) simplificando o sistema de controle.

Desvantagens: O principal desafio dos pesquisadores da MCFC tem origem na corrosão e na mobilidade dos eletrólitos, os quais necessitam do uso de níquel e de aço inoxidável na estrutura da célula (mais barato que a grafite, porém mais caro que aços ferríticos). Temperaturas altas promovem problemas com o material, impactando na estabilidade mecânica e na vida da célula. Uma fonte de CO₂ é necessária no catodo (comumente reciclada da exaustão do anodo) para formar íons de carbonato, representando componentes do sistema de controle adicionais. Altas resistências de contato e resistência do catodo limitam a densidade de corrente em torno de 100 – 200 mW/cm² nas voltagens de operação práticas.

2.5.5 Célula de combustível de óxido sólido (SOFC)

O eletrólito na célula é um óxido de metal sólido não-poroso, geralmente Y₂O₃ – estabilizado ZrO₂. A célula opera entre 600 e 1000°C onde conduções iônicas de íons de oxigênio acontecem. Geralmente, o anodo é formado de CO-ZrO₂ ou Ni-ZrO₂ e o catodo é formado de LaMnO₃ e misturado com Sr.

A condutividade em eletrólitos sólidos necessita de uma temperatura em torno de 1000°C; porém recentemente células com eletrólito fino com um catodo mais eficiente têm permitido uma diminuição na temperatura de operação para

650 – 850°C. Alguns pesquisadores estão conseguindo reduzir a temperatura de operação ainda mais. Com o tempo, isto tem permitido a construção de SOFC mais compactas, com melhores desempenhos devido a eletrólitos mais finos e o uso de materiais mais baratos.

Vantagens: SOFC é a célula com o período de desenvolvimento mais longo a partir de 1950, muitos anos antes da célula AFC. Por causa de um eletrólito sólido, a célula pode ter vários formatos, como tubular, plano ou monolítico. A construção da cerâmica nessas células evita qualquer problema com corrosão. Eletrólitos sólidos também permitem precisão no projeto de lâminas difusoras e evita o movimento do eletrólito ou a inundação dos eletrodos. A cinética da célula é relativamente rápida e o CO é diretamente usado como combustível da mesma forma que na MCFC. Não existe necessidade de CO₂ no catodo como na MCFC. Os materiais usados na SOFC não são caros. O eletrólito fino plano na SOFC tem demonstrado ser um sistema de densidade de corrente parecida com as alcançadas pela PEFC. Como na MCFC, a alta temperatura de operação permite o uso do calor em cogeração. O limite das eficiências que vão de 40% (sistemas pequenos com ciclos simples) até 50% (sistemas híbridos) tem sido demonstrado.

Desvantagens: A alta temperatura da SOFC tem suas desvantagens. Existem muitas expansões térmicas que não são acompanhadas entre os materiais e a aplicação de selos entre as células é difícil em configurações com placas planas. As altas temperaturas de operação colocam restrições severas na seleção de materiais e resultam em difíceis processos de fabricação. Corrosão de metal nos componentes da pilha (como os interconectores em alguns projetos) é um desafio. Estes fatores limitam a densidade de corrente (mais do que na PAFC e MCFC), ciclo térmico e vida na pilha (melhor no que na MCFC e PEFC).

A Tab. 2 apresenta as vantagens e desvantagens das pilhas de combustível em cogeração.

Tabela 2: Vantagens e desvantagens das pilhas de combustível em cogeração [25]

	Pilhas de combustível de baixa temperatura	Pilhas de combustível de alta temperatura
Tecnologias aplicáveis	<ul style="list-style-type: none"> • AFC • PAFC • PEFC/PEM 	<ul style="list-style-type: none"> • MCFC • SOFC
Dimensão típica	<ul style="list-style-type: none"> • Os produtos disponíveis no mercado e em desenvolvimento têm potências até 250 kW 	<ul style="list-style-type: none"> • A maioria dos equipamentos em desenvolvimento tem potências na ordem de 2 MW, mas existem planos para desenvolver unidades com menos de 1MW
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Emissões reduzidas • Arranque rápido (especialmente as PEMFC) • Potencial para a redução do custo resultante da produção em larga escala se for alcançado sucesso na área dos transportes 	<ul style="list-style-type: none"> • Emissões reduzidas • Processamento de combustível mais simples • Não existe a necessidade de utilizar catalisadores de metais nobres • Não são danificadas pelo CO • Potências mais elevadas
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial de cogeração limitado • Processamento de combustível relativamente complexo • Mais sensível ao CO • Requer catalisadores de metais nobres • Custo elevado (PAFC) 	<ul style="list-style-type: none"> • Mercado limitado inicialmente à produção de eletricidade (o que reduz o potencial para redução do custo) • Complexidade dos sistemas híbridos

2.6 Características

Outras características vantajosas de que células de combustível e plantas das células oferecem são:

- Conversão de energia direta (sem combustão)
- As partes dos conversores de energia não apresentam movimento
- Não apresentam barulho
- Flexibilidade de combustível
- Flexibilidade de lugar

Das características desvantajosas das células de combustível, destacam-se:

- Alto custo para entrar no mercado
- Tecnologias não muito familiares
- Sem infra-estrutura

Na Tab. 3 estão os impactos provocados pelos constituintes do combustível em cada tipo de célula.

Tabela 3: Resumo dos impactos causados pelos constituintes do combustível [11].

Tipo de gás	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
H ₂	Combustível	Combustível	Combustível	Combustível	Combustível
CO	Veneno (reversível) (50 ppm por pilha)	Veneno	Veneno (<0,5%)	Combustível ^a	Combustível
CH ₄	Diluído	Veneno	Diluído	Diluído ^b	Combustível ^a
CO ₂ & H ₂ O	Diluído	Veneno	Diluído	Diluído	Diluído
S (H ₂ S & COS)	-	Veneno	Veneno (<50 ppm)	Veneno (<0,5 ppm)	Veneno (<1 ppm)

a) Na realidade, CO com H₂O muda para H₂ e CO₂, e CH₄ com H₂O são reformados em H₂ e CO mais rápido do que reagindo como um combustível no eletrodo.

b) Um combustível na reforma interna da MCFC.

2.7

Sistemas de potência auxiliar

2.7.1

Configuração de sistema

Baseado nas necessidades do sistema discutido acima, as células PEFC consistirão de um processador de combustível, um sistema de pilha e um sistema de controle. A Fig. 4 lista os componentes necessários na PEFC. O principal motivo desses componentes é minimizar ou eliminar o uso da água que é fornecida externamente. Para este tipo de célula, baterias da partida serão necessárias, desde que potência elétrica externa não esteja disponível.

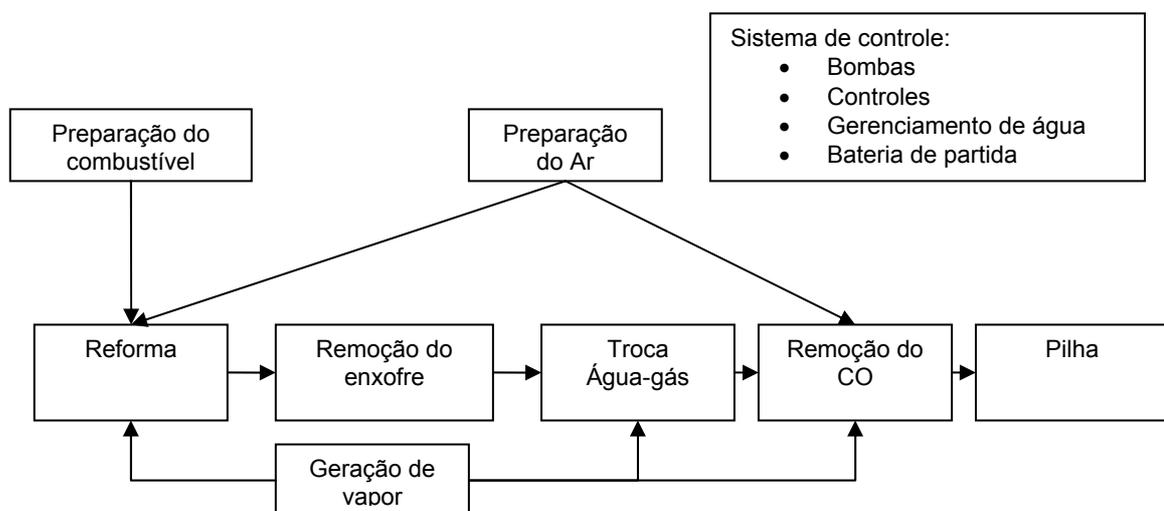


Figura 4: Resumo dos subsistemas e componentes da PEFC.

Com relação às necessidades de funcionamento da pilha, a remoção do monóxido de carbono também é importante para produzir o reformado de qualidade suficiente. Similarmente, a temperatura de operação da pilha e sua umidade requerem um sistema de gerenciamento de água assim como radiadores para a rejeição do calor. Algumas células possuem sistemas pressurizados para se beneficiar das altas pressões parciais do anodo e do catodo. Outra questão importante é a minimização do vapor necessário para processar o combustível. Por ser uma unidade móvel, a necessidade de recursos externos de água deve ser minimizada. O gás reformado é logo em seguida diluído com vapor, se a água não for removida antes da pilha.

Outra questão importante na célula é o gerenciamento de água para hidratar o eletrólito e fornecer o vapor necessário para as operações de reforma e troca de água-gás. O vapor é necessário para a remoção de CO. Algumas células funcionam sobre pressão para aumentar a pressão parcial dos reagentes que vão para o anodo e o catodo, aumentando a eficiência. A pressão de operação também ajuda na integração do calor para a geração interna de vapor à pressões maiores que a atmosférica (vapor é gerado à temperaturas maiores que 100°C). A integração da célula ocorre combinando um reformador (exotérmico ou endotérmico de 850-1000°C), câmaras de troca (exotérmico, 150-500°C), limpeza de CO (praticamente exotérmico 50-200°C) e a pilha da célula (exotérmico 80°C). Cada zona de operação possui uma temperatura diferente, contudo fornece um desafio para a integração do sistema e para a rejeição de calor. Para aliviar algumas dessas desvantagens e também reduzir o custo do sistema, pesquisadores estão investigando a possibilidade de usar membranas que funcionem a uma alta temperatura (operando levemente acima de 100°C). Isto aumentaria a tolerância a monóxido de carbono, simplificando o projeto do reformador e a rejeição do calor.

2.8

Geração distribuída

As células de combustível já hoje são usadas em centrais de produção de energia com potências reduzidas (menos de uma dezena de MW). Estão sendo colocadas perto dos equipamentos consumidores, podendo assim ser consideradas uma tecnologia de geração distribuída.

Tabela 4: Eficiências dos sistemas de geração distribuída

Tipo	Tamanho	Eficiência, %
Micro turbinas	10 kW – 300kW	20 – 30
PAFC	50 kW – 1MW	40
SOFC	5 kW – 3MW	45 – 65
PEM	1 kW – 1MW	34 – 36

Apostando na produção local (descentralizada) poupa-se no investimento da construção de linhas de transmissão de energia, na proteção destas e outros equipamentos auxiliares, bem como, na manutenção dessas infra-estruturas. Um outro aspecto de economia são os custos de exploração, uma vez que as perdas energéticas, com a produção descentralizada, são consideravelmente reduzidas em linhas, nos transformadores (elevadores e abaixadores), bem como, na quantidade de aparelhagem de proteção com diminuição do número.

2.9 Cogeração

Aplicações com cogeração em edifícios podem ser projetadas para satisfazer tanto parte da demanda elétrica quanto parte da demanda térmica.

Com isso, cogeração em edifícios pode ser projetada para aplicações com picos suaves, isto é, a planta de cogeração é usada para reduzir o pico de demanda elétrica ou de demanda térmica.

2.10 Conclusões

Não importando o quanto ambientalmente corretas as células de combustível possam ser, como qualquer outro produto ou fonte de energia, seu sucesso no mercado depende primariamente de seu preço. Muitos desafios tecnológicos deverão ser vencidos antes que os vários sistemas que compõem uma célula de combustível sejam fabricados industrialmente, com custos adequados.

2.11 Desempenho da célula

O objetivo deste capítulo é descrever as relações químicas e termodinâmicas que governam as células e como as condições de operação afetam o seu desempenho. Entendendo o impacto das variáveis como temperatura, pressão e os componentes do gás no desempenho permitem aos pesquisadores otimizar seus projetos das unidades e permite aos engenheiros de processos maximizarem o desempenho da aplicação dos sistemas.

O primeiro passo para entender a operação de uma célula é definir o desempenho ideal. Uma vez determinadas, as perdas que ocorrem em função de princípios não comuns podem ser calculadas e depois deduzidas do desempenho ideal para descrever a operação real.

2.11.1 O papel da energia livre de Gibbs

O máximo trabalho elétrico obtido (\dot{W}_{el}) numa célula operando à uma temperatura e pressão constante é dada pela variação da energia livre de Gibbs (ΔG) da reação eletroquímica:

$$\dot{W}_{el} = \Delta G = -nF \dot{E} \quad (1)$$

onde n é o número de elétrons participando da reação e F é a constante de Faraday (96,487 coulomb/g-mol de elétron) e \dot{E} é o potência ideal da célula.

A variação da energia livre de Gibbs é também dada pela seguinte equação:

$$\Delta G = \Delta h - T\Delta s \quad (2)$$

onde o Δh é a variação de entalpia e Δs é a variação de entropia. A energia térmica total disponível é Δh . A energia livre disponível é igual a variação de Δh menos a variação $T\Delta s$ a qual representa a energia não-disponível resultando da variação de entropia com o sistema.

A quantidade de calor que é produzido pela célula operando reversivelmente é $T\Delta s$. As reações na célula que têm variação de entropia negativa geram calor (como oxidação do hidrogênio), enquanto que aquelas com

variação de entropia positiva (como a oxidação direta do carbono sólido) podem extrair calor do meio se a geração irreversível de calor for menor que a absorção reversível de calor.

Para a reação geral da célula:



o estado padrão da variação da energia livre de Gibbs é dado por:

$$\Delta G^\circ = \gamma G_c^\circ + \delta G_d^\circ - \alpha G_a^\circ - \beta G_b^\circ \quad (4)$$

onde G_i é a quantidade molar parcial da energia livre de Gibbs para o componente i à temperatura T . Esse potencial pode ser computado pelo calor específico (c_p) dos componentes em função de T e dos valores Δs e Δh à temperatura de referência, geralmente 298K. Experimentalmente, o calor específico dos elementos, em função de T , pode ser expressa em:

$$c_p = a + bT + cT^2 \quad (5)$$

onde a , b e c são constante empíricas. A entalpia de cada elemento presente durante a reação é dada por

$$h_i = h_i^\circ + \int_{298}^T c_{pi} dT \quad (6)$$

e à uma pressão constante a entropia à temperatura T é dada por:

$$s_i = s_i^\circ + \int_{298}^T \frac{c_{pi}}{T} dT \quad (7)$$

Com isso: h_i

$$\Delta h = \sum_i n_i h_{iout} - \sum_i n_i h_{iin} \quad (8)$$

e

$$\Delta s = \sum_i n_i S_{iout} - \sum_i n_i S_{iin} \quad (9)$$

Os coeficientes a, b e c, assim como h° e s° , estão disponíveis nas tabelas de referências e podem ser usados para calcular Δh e Δs . Com esses valores é possível calcular ΔG e \bar{E} à uma temperatura T.

2.11.2 O desempenho ideal

O impacto da temperatura na tensão ideal, E, para a oxidação do hidrogênio, é também mostrado na Tab. 5. Foram assumidos produtos gasosos.

Tabela 5: Tensão ideal em função da temperatura da célula.

Temperatura	80°C (353K)
Tensão ideal	1,17

A tensão do circuito aberto da célula é fortemente influenciada pela concentração dos reagentes. O potencial ideal máximo ocorre quando os reagentes no anodo e no catodo são puros. Em um sistema alimentado com ar ou se o que chega ao anodo não é hidrogênio puro, o potencial da célula será reduzido. Similarmente, a concentração de reagentes na saída da célula será mais baixa que na entrada. Pelo fato de os eletrodos terem que ser mais condutivos e conseqüentemente possuir uma tensão constante, uma pequena queda de tensão no circuito afeta a operação da célula inteira. Isso impacta significativamente na tensão de operação da célula e conseqüentemente na eficiência do sistema principalmente em células de temperatura mais alta.

Células de baixa temperatura necessitam de catalisadores feitos com metais nobres para alcançarem reações práticas no anodo e no catodo e H_2 é o único combustível aceitável. Enquanto monóxido de carbono envenena severamente os catalisadores feitos de metais nobres como a Platina (Pt) em células de baixa temperatura, em células de alta temperatura atuam como reagentes (operando em temperatura de 300°C ou mais) onde catalisadores de metais não-nobres podem ser usados.

2.11.3 Balanço energético da célula

A discussão acima pode ser usada para formular um balanço de massa e energia em torno de uma célula para descrever seu desempenho elétrico. O balanço energético em torno da célula é baseado na absorção de energia/processo de liberação (eletricidade produzida, reações, perda de calor) que ocorre na célula.

Em geral, o balanço energético da célula mostra que a variação da entalpia dos reagentes que entram na célula será igual a variação de entalpia dos produtos que saem da célula mais a soma dos termos livres: i) o calor gerado pelos processos físicos e químicos da célula, ii) a corrente DC que sai da célula e iii) a perda de calor da célula para o meio.

2.11.4 Eficiência da célula

A eficiência térmica de um aparelho de conversão de combustível é definida pela relação entre a quantidade de energia produzida relativa e a variação de entalpia, ΔH , entre os produtos e os reagentes.

$$\eta = \frac{\text{Energia}}{\Delta h} \quad (10)$$

Em máquinas térmicas convencionais, a energia química (do combustível) é primeiramente convertida em calor, depois convertida em energia mecânica e depois pode ser convertida para energia elétrica. Para a conversão térmica em mecânica, calor é convencionalmente usado. Carnot mostrou que a eficiência máxima de cada máquina é limitada pela razão entre a temperatura absoluta de calor que é rejeitado e absorvido, respectivamente, para reservatórios a temperatura constante.

As células de combustível convertem diretamente energia química em energia elétrica. No caso ideal de um conversor eletroquímico, como o das células de combustível, a variação da energia livre de Gibbs, ΔG , da reação é disponível na energia elétrica na temperatura de conversão. A eficiência ideal da célula, operando reversivelmente, é

$$\eta_{\text{ideal}} = \frac{\Delta G}{\Delta h} \quad (11)$$

A eficiência da célula é baseada na variação da energia livre para a reação



dado por

$$\Delta G_r^\circ = G^\circ_{\text{H}_2\text{O}(l)} - G^\circ_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} G^\circ_{\text{O}_2} \quad (13)$$

onde a água sai na forma líquida. Nas condições padrões de 25°C (298°K) e 1 atmosfera, a energia térmica liberada (Δh) na reação hidrogênio/oxigênio é 285,8 kJ/mole e a energia livre disponível para o trabalho é 237,1 kJ/mole. Com isso, a eficiência térmica de uma célula ideal operando reversivelmente com hidrogênio e oxigênio puro nas condições padrões é:

$$\eta_{\text{ideal}} = \frac{237,1}{285,8} = 0,83 \quad (14)$$

Para outras reações eletroquímicas, se aplicam diferentes eficiências. Curiosamente, para a oxidação química direta de carbono, ΔG é maior do que ΔH e conseqüentemente a eficiência ideal é levemente maior do que 100% quando é usada essa definição de eficiência ideal.

Por conveniência, a eficiência de uma célula verdadeira é frequentemente expressa em termos da razão entre a tensão da célula e sua tensão ideal. Como será descrita com grandes detalhes nas seções seguintes, a tensão da célula real é menor do que a tensão da célula ideal devido às perdas associadas com a polarização da célula e as perdas ôhmicas. A eficiência térmica da célula pode ser escrita em função da tensão real:

$$\eta = \frac{\text{Energia}}{\Delta h} = \frac{\text{Potência}}{\Delta G / 0,83} = \frac{\text{Tensão}_{\text{real}} \times \text{Corrente}}{\text{Tensão}_{\text{ideal}} \times \frac{\text{Corrente}}{0,83}} = \frac{0,83 \times V_{\text{real}}}{E_{\text{ideal}}} \quad (15)$$

Como mencionado anteriormente, a tensão ideal da célula operando reversivelmente com hidrogênio e oxigênio puro a 1atm e 25°C é 1,229V [11]. Com isso, a eficiência térmica de uma célula real operando a uma tensão $V_{\text{célula}}$, baseada no PCS do hidrogênio, é dada por:

$$\eta = 0,83 \times V_{\text{célula}}/E_{\text{ideal}} = 0,83 \times V_{\text{célula}}/1,229 = 0,65 \times V_{\text{célula}} \quad (16)$$

Isso mostra que o combustível é completamente convertido na célula, como na maioria das máquinas térmicas. Essa eficiência também é mencionada na eficiência elétrica. Para calcular a eficiência da célula, a eficiência elétrica deve ser multiplicada pela utilização do combustível. Uma ótima revisão do impacto deste fenômeno pode ser estudada em Winkler [6].

2.12 Célula de combustível de eletrólito polimérico

A tecnologia PEFC se diferencia das outras tecnologias pelo fato de utilizar um eletrólito polimérico. Pelo fato desse eletrólito ser um filme polimérico e a célula operar à baixas temperaturas, questões como vedação, construção e operação são menos complexas que na maioria das outras células. Não é necessário operar com ácidos ou bases corrosivos neste tipo de célula. PEFCs tipicamente operam à baixa temperatura (60 a 80°C), permitindo uma partida mais rápida do que nas células que operam à alta temperatura. Como PEFCs são projetadas para operações com hidrogênio puro, processadores têm sido desenvolvidos para permitir o uso de combustíveis convencionais como gás natural e gasolina.

2.12.1 Componentes da célula

Os típicos componentes da pilha de uma PEFC, ilustrados na Fig. 5, são:

- uma membrana para troca iônica
- uma camada porosa eletricamente condutora
- um catalisador (eletrodo) na interface entre a camada e a membrana
- interconectores e placas que enviam combustível e oxidante para lugares reativo através de canais conectam eletricamente a célula.

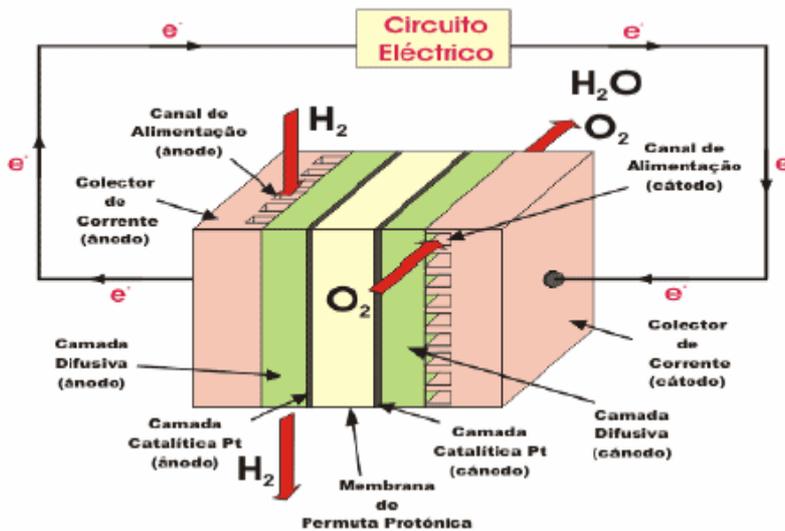


Figura 5: Esquema típico de representação de uma pilha.

As pilhas de PEFC são na maioria de tipo bipolar plano. Tipicamente, os eletrodos são revestidos com filmes finos que são também transferidos para a membrana ou aplicados diretamente na membrana. Alternadamente, a camada de eletrodo pode ser depositada na camada que a antecede e depois conectada com a membrana.

Uma célula de combustível PEM (Proton Exchange Membrane) consiste em dois eletrodos: o anodo – “eletrodo combustível” – e o catodo – “eletrodo oxidante” - separados por um eletrólito. Quando o hidrogênio ingressa no sistema, as propriedades catalíticas da superfície da membrana liberam elétrons e prótons das moléculas de hidrogênio. A membrana tem a propriedade de ser permeável aos prótons, que a atravessam e formam água ao reagir com o oxigênio do ar (lado catodo); os elétrons que não podem atravessar a membrana circulam por um elemento condutor externo à membrana, dando lugar a corrente contínua “DC”. Este processo além de produzir corrente elétrica gera energia térmica aproveitável.

O coração de uma célula de combustível é constituído por um “conjunto membrana eletrodo” – CME. Este está constituído por duas capas difusoras de gás com duas lâminas bipolares em cada lado. As propriedades catalisadoras deste conjunto que produzem a divisão da molécula de hidrogênio e oxigênio se baseiam nas propriedades dos metais preciosos, como a platina, nela depositados.

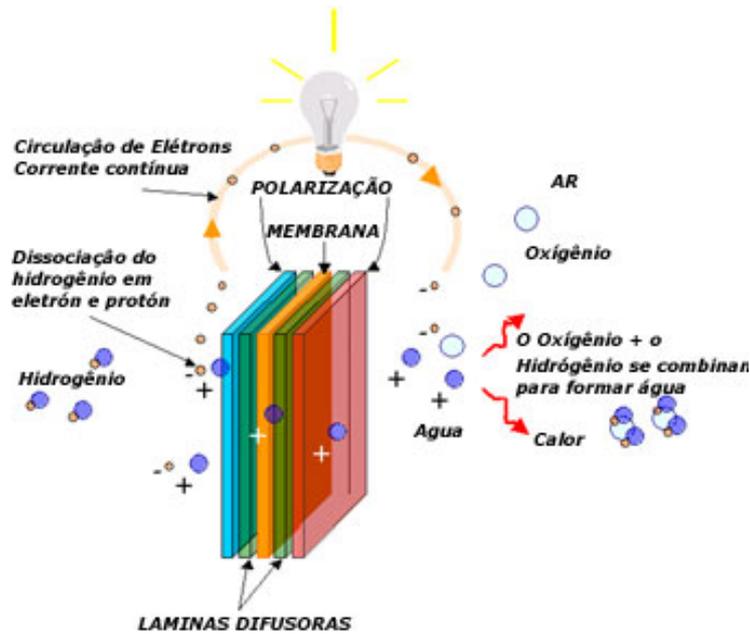


Figura 6: Esquema de uma pilha.

Para gerar quantidades utilizáveis de corrente, se colocam sucessivos CMEs, formando a denominada pilha. Mediante esta configuração, se alcança a potência (tensão e corrente elétrica) requerida.

Conceitualmente uma célula de combustível tipo PEM está formada por:

- reformador
- pilha
- condicionador de energia
- sistema de controle

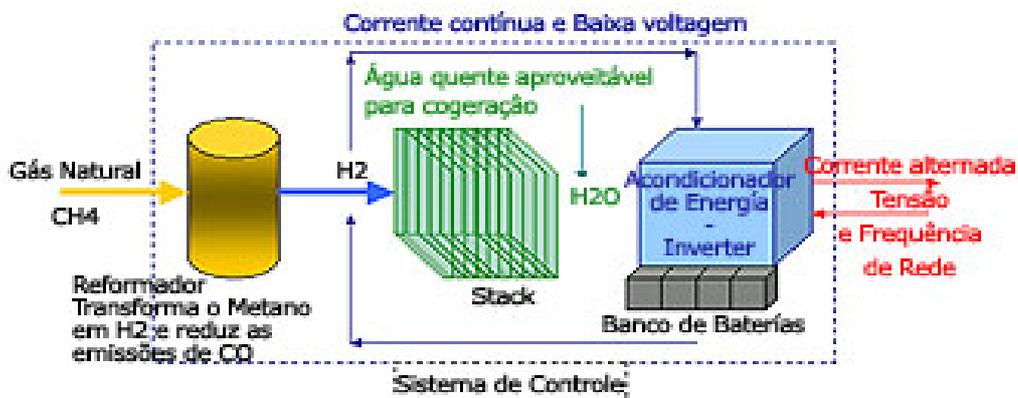


Figura 7: Esquema de uma célula de combustível.

No reformador entra o combustível (gás natural) e se produz um gás altamente rico em hidrogênio denominado "reformado", mediante uma transformação química.

O conteúdo de monóxido de carbono que possui o reformado se reduz a níveis aceitáveis (menores que 50 ppm), mediante uma unidade condicionadora.

Posteriormente o hidrogênio ingresa no sistema (pilha) dando início ao processo de geração de corrente contínua.

Esta corrente contínua circula pelo condicionador de energia, denominado inversor, o qual transforma a corrente contínua em corrente alternada, em valores de tensão e frequência requeridos por nossas aplicações.

Este condicionador inclui também um conjunto de baterias, que permitem estabilizar o fornecimento de energia antes das variações instantâneas da carga.

Assim, devido a considerações de construção da célula, calor será sempre liberado. Pesquisas foram realizadas para reduzir a quantidade de calor liberado e assim aumentar a quantidade de energia elétrica produzida. Em motores de combustão interna, a segunda lei da termodinâmica limita a quantidade de calor que pode ser convertida em trabalho. Assim, potencialmente, células de combustível podem ser mais eficientes do que máquinas de calor [21].

2.12.1.1

Estado da arte dos componentes

Membrana

A membrana polimérica é uma membrana ácida que tem como função transportar prótons. Os prótons então são transportados através da membrana e assim chegam ao outro lado da célula, no catodo.

2.12.1.2

Desempenho

Os pesquisadores estão focados em manter a densidade de potência enquanto reduzem a quantidade de platina (catalisador), aumentando a temperatura e a umidade e outras melhorias que irão reduzir o custo.

2.12.2 Sistema da célula de combustível

Embora uma célula de combustível produza eletricidade, o seu sistema requer uma integração de muitos componentes além da pilha. Vários componentes do sistema estão incorporados a um sistema elétrico para permitir uma operação com combustíveis convencionais, para produzir corrente AC para rede e frequentemente para utilizar calor rejeitado alcançando uma alta eficiência. Em uma forma simples, o sistema da célula consiste de um processador de combustível, de um sistema elétrico e potencialmente de uma cogeração para utilizar o calor rejeitado.

A célula e a pilha que compõe o sistema elétrico foram discutidas extensivamente nas seções anteriores. A seção 2.12.2.1 aborda os processos dos sistemas como os processadores de combustível, a utilização do calor rejeitado, os inversores e o desempenho do equipamento. As questões referentes à otimização do sistema serão discutidas na seção 2.12.2.2.

2.12.2.1 Processos do sistema

O projeto de um sistema de uma célula de combustível envolve mais do que a otimização das partes da célula com respeito à eficiência e economia. Envolve redução do custo de eletricidade (ou calor e eletricidade como no sistema de cogeração) com os parâmetros da aplicação desejada. Para a maioria das aplicações, é necessário que os processos fundamentais sejam integrados com uma eficiência dentro da planta com um baixo custo. Frequentemente esses objetivos são tão conflitantes que acordos ou ajustes de projeto devem ser feitos. Com isso, objetivos específicos de projeto, como combustível desejado, níveis de emissões, uso do calor rejeitado (eletricidade, vapor ou calor), níveis de demanda desejada, volume ou critério de peso (volume/kW ou peso/kW) e a tolerância de risco influenciam no projeto do sistema elétrico da célula.

2.12.2.2 Reforma do combustível

A reforma é definida como a conversão de um gás disponível comercialmente para um gás reformado pronto para a reação no anodo da célula. A reforma inclui a limpeza e a remoção de substâncias danosas do combustível, a conversão do combustível em um gás reformado e os processos seguintes para alterar o gás reformado de acordo com as necessidades da célula. Exemplos desses processos são:

- Limpeza do combustível – Remoção de enxofre e amônia para prevenir uma degradação do reformador e do catalisador.
- Conversão de combustível – Converte um combustível (principalmente hidrocarbonetos) em gás reformado rico em hidrogênio.
- Alteração do gás reformado – Converte monóxido de carbono (CO) e água (H₂O) do gás reformado em hidrogênio (H₂) e dióxido de carbono (CO₂) via a reação de troca água-gás; oxidação seletiva para reduzir CO em poucos ppm ou remoção de água por condensação para aumentar a concentração de H₂.

Um processador de combustível é uma unidade integrada que consiste em um ou mais dos processos acima devido às necessidades e ao combustível, que funcionam juntos para um eficiente custo da aplicação. Considerações de projeto devem incluir alta eficiência térmica, alta produção de hidrogênio, compatibilidade, baixo peso e rápida capacidade inicialização, dependendo da aplicação.

A Fig. 8 representa os passos da reforma necessários para uma célula que funciona à baixa temperatura. A maioria dos processadores usa a energia química e térmica dos líquidos para fornecer calor para a reforma do combustível aumentando a eficiência do sistema.

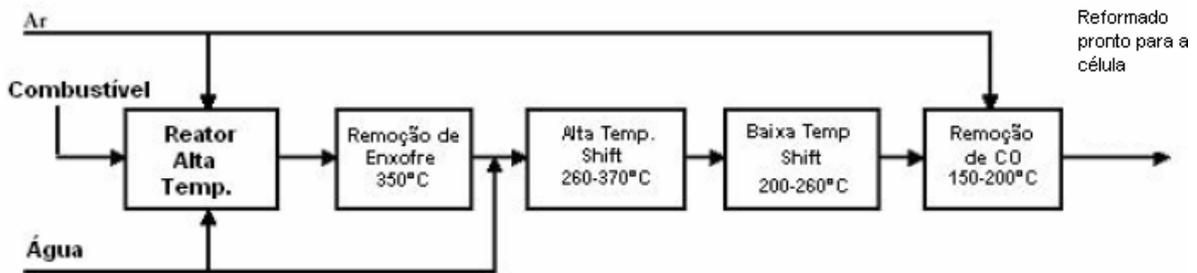


Figura 8: Esquema da reforma do combustível.

A conversão de combustível e a alteração dos catalisadores são suscetíveis à desativação devido às impurezas, contudo o processo de limpeza é realizado junto com o processo de conversão. Os processos de conversão do combustível e reforma do gás podem ser realizados na parte externa ou no compartimento do anodo da célula. O primeiro se refere ao reformador externo e o segundo ao reformador interno da célula. As células estão se desenvolvendo para reagir diretamente com gás disponível comercialmente e com combustível líquido, porém a reação química ideal para as células atuais é com gás rico em hidrogênio.

A unidade utiliza um reformador de combustível, o qual gera todo o hidrogênio (H_2) necessário para a pilha (composto de 88 células) e com isso gera energia elétrica. Isto consiste em três zonas de separação em série, conforme a vazão de ar/combustível: (a) oxidação parcial catalítica (CPO), (b) conversão à alta temperatura (HTS) e (c) conversão à baixa temperatura (LTS), (Plug Power, 2001).

Durante a operação de reforma, uma mistura de ar/gás entra no reformador e passa através da zona CPO, onde o gás natural reage com o oxigênio, criando H_2 e monóxido de carbono (CO) em uma reação chamada oxidação parcial. A temperatura de operação normal do CPO fica entre 600 e 900 °C.

Depois a mistura entra na zona HTS. O CO da reação de catálise do CPO pode prejudicar a pilha e deve ser removido. O HTS desempenha esta função reagindo CO com vapor, criando o dióxido de carbono (CO_2) e hidrogênio adicional como sub-produto. A catálise do HTS é eficiente em temperaturas entre 300 e 500 °C. O calor gerado na sua reação é também usado para aquecer o gás que chega na zona CPO.

A zona LTS executa a mesma reação que o HTS faz, porém a uma temperatura mais baixa. O LTS é mais eficiente na troca de CO em CO₂ em temperaturas entre 190 a 250 °C.

O gás reformado que chega do reformador principal contém ainda CO na ordem de 2000 a 3000 ppm. Por causa disso, outros reformadores chamados de PROX (Oxidação Preferencial) têm a função de reduzir a concentração de CO para aproximadamente 50 ppm ou menos. O CO pode danificar a pilha com níveis superiores a 50 ppm. A reação no PROX é executada com adição de ar nos gases entrando no PROX. O oxigênio do ar reage com o CO formando o CO₂. Esta reação é desejável, porém da mesma forma que o CO reage com o O₂, hidrogênio também reage com o O₂ para formar água (H₂O). Para controlar a quantidade de hidrogênio consumida no PROX, a temperatura é controlada entre 130 e 150 °C.

O gás reformado rico em hidrogênio alimenta o anodo da pilha para gerar energia elétrica em corrente DC liberando calor. A corrente DC é convertida em corrente AC em um inversor.

As temperaturas em todos os processos são controladas por trocadores de calor instalados dentro da unidade e adicionalmente, a unidade foi preparada para um aproveitamento do calor adicional, proporcionando uma cogeração utilizada para aquecimento de água para uso residencial ou comercial.

A corrente residual de gases do anodo é oxidada numa câmara – ATO – onde o calor da reação utilizado para vaporizar a água de alimentação da pilha, também reduzir os componentes dos gases da exaustão a dióxido de carbono, nitrogênio e água.

A recuperação de calor é executada basicamente em três sistemas: (a) circuito de água do umidificador, (b) circuito de resfriamento do sistema e (c) circuito de resfriamento da pilha.

O circuito de resfriamento da pilha controla sua temperatura. A temperatura de entrada da pilha é mantida a aproximadamente 63 °C em todo o nível de desempenho. O circuito utiliza uma bomba de velocidade variável, um trocador de calor de corrente cruzada (HX2) e um fluido trocador de calor chamado de terminol para manter a temperatura relativamente constante na pilha. Com o aumento da demanda, o calor gerado na pilha também aumenta. Esta carga é dominada pela bomba que aumenta a vazão de terminol através do HX2 e rejeita mais calor para o circuito de resfriamento do sistema.

O circuito controla a temperatura da água, da pilha e do combustível no sistema, dissipando calor em excesso. O circuito que também inclui o fluido

glicol, consiste, devido à cogeração, de três trocadores de calor (HX1, HX2 e HX3). O propileno glicol é o fluido refrigerante do sistema. Este é pré-misturado com água deionizada. O HX3 é um trocador de corrente cruzada. HX1 é um trocador de corrente cruzada com água DI de um lado e propileno glicol de outro. A função do HX1 é controlar a temperatura da água no umidificador e do reformador.

Pontos importantes dos processadores de combustível

Os principais pontos que influenciam o desenvolvimento de um processador de combustível são 1) escolha de combustíveis disponíveis comercialmente apropriados para aplicações específicas; 2) flexibilidade de combustível; 3) tolerância dos catalisadores; 4) tamanho da célula e 5) vaporização dos hidrocarbonetos pesados. Hidrocarbonetos pesados, como o diesel, necessitam de temperaturas de vaporização que variam entre 350 e 400°C.

Tolerância dos catalisadores

Esse cuidado resulta dos efeitos da deposição do enxofre, monóxido de carbono e carbono nos catalisadores da célula. A atividade dos catalisadores para a reforma do vapor e a reforma autotérmica pode ser afetada pelo envenenamento com enxofre; isso acontece com a maioria dos combustíveis usados nas células atualmente.

Efeitos do enxofre

O efeito é agravado quando existem componentes contendo o níquel ou ferro, incluindo catalisadores que são sensíveis ao enxofre e metais nobres como os encontrados nos eletrodos de células de baixa temperatura. Em resumo, a tolerância ao enxofre é:

- PEFC - <50 ppm de enxofre como H₂S, o envenenamento é cumulativo e não reversível.

Efeitos do monóxido de carbono

- PEFC – Tolerância <50 ppm no anodo.

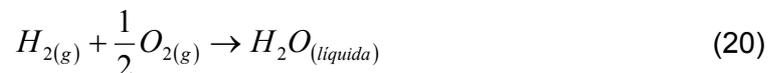
2.12.2.3

Considerações Teóricas da Célula de Combustível Tipo PEM

As Eq. 17, 18 e 19 a seguir descrevem, respectivamente [21], a reação do anodo, a reação do catodo e a formação de água. Considerando 1 kmol de hidrogênio, as seguintes equações podem ser escritas juntas com todos os parâmetros.



A reação química global pode ser escrita como [21]:



Na Eq. 20 foi considerado um estado de referência (0,1 MPa e 25°C) para o hidrogênio [21], o oxigênio e a água.

De acordo com a segunda lei da termodinâmica, o trabalho reversível entre os dois estados na Eq. 20, desprezando a variação de energia cinética e potencial, pode ser escrita como:

$$\dot{W}^{rev} = \Delta G = \Delta h - T\Delta s \quad (21)$$

A eficiência teórica da célula PEM (η_{TH}) pode ser definida como a razão entre o trabalho reversível e a variação de entalpia[21]:

$$\eta_{TH} = \frac{\Delta G}{\Delta h} \quad (22)$$

Considerando água líquida na Eq. 20 [21] foi calculada uma eficiência térmica nas condições de referência de 83%.

A eficiência térmica da pilha (η_T) está relacionada com a entrada de hidrogênio [21], ou seja, pode ser calculada pela razão entre a energia elétrica que sai e a energia do hidrogênio que entra, conforme a Eq. 23 a seguir:

$$\eta_T = \frac{(2FV_{exit})}{PCS_{H_2}} \quad (23)$$

onde:

F é a constante de Faraday,

$PCS_{H_2} = 28530$ kJ/kmol de H₂ é o poder calorífico superior do hidrogênio,

V_{exit} é a tensão de saída da célula (tensão média).

Substituindo os valores:

$$\eta_T = \frac{V_{exit}}{1,481} \quad (24)$$

A Eq. 24 leva em conta todas as perdas em função da sobrecarga e das condições de operação, quando opera com hidrogênio puro. Outra maneira de definir eficiência térmica é multiplicando a razão entre a tensão que sai da célula (V_{exit}) e a tensão reversível teórica (E_{Trev}) pela eficiência térmica da pilha teórica (η_{TH}).

$$\eta_T = \left(\frac{V_{exit}}{E_{Trev}} \right) \eta_{TH} \quad (25)$$

De posse da eficiência térmica da pilha (η_T), a energia química do hidrogênio (E_{H_2}) é dada por [21]

$$E_{H_2} = m_{H_2,u} . PCS_{H_2} \quad (26)$$

onde:

$\dot{m}_{H_2,u}$ é o hidrogênio que entra na pilha,

PCS_{H_2} é o poder calorífico superior do hidrogênio.

O calor rejeitado da pilha (Q_{rej}) é obtido pela Eq. 27 a seguir.

$$Q_{rej} = E_{H_2}(1 - \eta_T) \quad (27)$$

onde E_{H_2} é a energia química do hidrogênio.

Em aplicações de geração de energia elétrica, uma das maneiras mais praticáveis de alimentar uma célula é por meio do gás natural [21]. Isto requer o uso de um processador de combustível ou de um reformador, que converte cataliticamente gás natural ou outro combustível fóssil em hidrogênio [9]. Considerando, como uma referência, a água no estado vapor, a eficiência do reformador típica fica entre 75% e 90% [9]. A eficiência do reformador (η_R) é definida pela razão entre a energia química do hidrogênio produzido e a energia química do gás natural, consumido no reformador.

$$\eta_R = \frac{\dot{m}_{H_2,R} \cdot PCI_{H_2}}{\dot{m}_{gas} \cdot PCI_{gas}} \quad (28)$$

onde:

$\dot{m}_{H_2,R}$ é a quantidade de hidrogênio gerada no processo de reforma,

\dot{m}_{gas} é a quantidade de gás natural que entra no reformador.

Existem três tipos de reformadores:

- Reformador de vapor (SR) – utiliza vapor. Requer uma grande quantidade de entrada de calor para o processador, por causa da reação de reforma endotérmica.
- Reformador de oxidação parcial (PO) – utiliza oxigênio gasoso ou ar. Queima parte do combustível, liberando calor para o processo de reforma.

- Reformador autotérmico – utiliza vapor e oxigênio (ou ar). Opera através do ponto neutro térmico, sem exigir ou liberar calor para o processo de reforma.

Finalmente, a eficiência térmica global da célula (η_G), baseado no PCI do gás natural que entra, incluindo a eficiência do reformador (η_R), pode ser expressa como:

$$\eta_G = \left[\eta_R \times \left(\frac{m_{H_2,u}}{m_{H_2,R}} \right) \times \left(\frac{V_{exit}}{E_{Trev}} \right) \times \eta_{CE} \right] \quad (29)$$

A eficiência de conversão (η_{CE}) é a razão entre a potência de saída para a rede AC, E_{out} (potência de saída AC menos a carga auxiliar) e a potência DC gerada pela célula. Também,

$$\eta_G = \frac{E_{out}}{m_{gas} . PCI_{gas}} \quad (30)$$

A eficiência global da célula (η_G), utilizando o PCI do gás, pode ser calculada pela razão entre a energia elétrica gerada (E_{out}) (potência AC média) e a energia de combustível fornecida (E_{gas}), conforme a Eq. 31 a seguir. A eficiência térmica global ($\eta_{G,SARC}$) é também calculada pelo SARC. A vazão de gás é expressa em litros normais por minuto (SLM) nas condições normais 20°C e 1 atm.

$$\eta_G = \frac{E_{out}}{E_{gas}} \quad (31)$$

2.13

Resultado dos estudos citados no item 1.2

2.13.1

Resultado do estudo feito pelo NIST

Para cada teste, a temperatura ambiente, a umidade relativa, os níveis de carga elétrica e carga térmica foram variados. Após a aquisição dos dados, as eficiências elétrica e térmica foram calculadas. A eficiência total é calculada pela soma das eficiências elétrica e térmica de cada teste.

Com isso, assim como em nosso estudo, muitas semanas de teste mostraram uma degradação perceptível na eficiência elétrica do sistema. O plano de teste original incluía testes periódicos nas mesmas condições para quantificar a esperada degradação, porém a queda da eficiência elétrica entre estes testes periódicos foi maior do que as mudanças no desempenho em função da mudança dos parâmetros de teste. Para uma potência de 2,5 kW, uma temperatura ambiente de 11,5°C, uma temperatura de entrada de 55°C e uma vazão de 5 LPM (litros por minuto) de óleo propileno glicol do trocador de calor, a célula não pôde fornecer uma corrente elétrica constante, a qual foi influenciada por um controle de algoritmos internos.

O teste foi feito para determinar o efeito de cinco diferentes parâmetros no desempenho da célula e as eficiências elétrica e térmica foram escolhidas como as medidas principais do desempenho.

Essa grande variação do desempenho térmico ocorreu em função das baixas condições térmicas de saída do óleo do trocador de calor à 5 LPM e 55°C. É suposto que enquanto os valores da eficiência podem variar, as mudanças relativas ao desempenho podem ser constantes.

Na teoria, a célula oferece uma eficiência elétrica de 40% a 50%. Na prática, contudo, a adição de um reformador para converter gás natural ou propano em hidrogênio e um inversor para converter a corrente DC em AC reduz significativamente a eficiência elétrica do sistema. Muitas demonstrações desse tipo de célula, por exemplo, têm relatado eficiências elétricas entre 20% e 30%.

A diferença entre o poder calorífico superior e inferior do gás é de 11%.

Os testes mostraram que enquanto a eficiência térmica respondia à temperatura ambiente, carga elétrica, temperatura de entrada do fluido e vazão do fluido, a eficiência elétrica foi afetada somente pela carga elétrica (potência de saída) e a vida útil do sistema.

Um plano de teste foi feito para determinar os efeitos da carga térmica em cima da eficiência elétrica e térmica do sistema.

Todos os testes foram realizados durante a retirada da energia térmica do sistema com uma vazão e uma temperatura de entrada do óleo do trocador de calor de 35 L/min e 55°C, respectivamente.

A eficiência global foi de aproximadamente 32%. Em um teste de campo com a célula fornecendo energia elétrica e água quente, foi medida uma eficiência global de 29,7% (PCI – poder calorífico inferior do gás natural).

A eficiência elétrica e térmica da célula mudou com as horas cumulativas de operação.

Especificamente, a carga térmica e as horas cumulativas afetaram a eficiência elétrica. A eficiência térmica depende da temperatura ambiente, da carga elétrica, da temperatura de entrada e da vazão do óleo do trocador de calor. Para aquecer a água de uma residência comum, a eficiência global foi menos de 32%. Contudo, a eficiência global poderia ser tão alta quanto 68% se toda a energia térmica produzida pelo sistema fosse utilizada.

2.13.2

Resultado do estudo feito pelo FEMP

Pilha da célula PEM

A membrana de troca de prótons (PEM) da célula usa um eletrólito polimérico em forma de uma folha fina. A PEM bloqueia elétrons mas permite íons positivos (mais prótons do que elétrons) passarem.

Hidrogênio é fornecido para o anodo e oxigênio para o catodo. Um catalisador de platina promove reações eletrolíticas no catodo.

A reação no anodo é: $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$

A reação no catodo é: $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Cada célula gera 0,7 V e uma pilha de 88 células é usada para gerar uma tensão 50 V. Como o polímero sofre com a temperatura, a pilha é limitada a 80°C. Isso faz com que as eficiências das células PEM sejam menores que as tecnologias que funcionam à alta temperatura, como as células de óxido sólido (SOFC) e células de carbonato fundido.

Reformador

Duas reações convertem vapor (H_2O) e gás natural (CH_4) em hidrogênio e dióxido de carbono (CO_2). Primeiramente, são produzidos hidrogênio e monóxido de carbono (CO) como um produto intermediário: $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$.

A segunda reação converte CO e vapor em CO_2 e mais hidrogênio: $H_2O + CO \rightarrow CO_2 + H_2$.

CH_4 residual e CO residual são as duas substâncias que remanescem, envenenando (envenenamento se refere ao acúmulo de componentes que reduzem a eficiência do catodo, anodo ou do eletrólito) a pilha. Contudo, eles são seletivamente queimados em presença de um catalisador antes de entrarem na pilha. Isso prolonga a vida da pilha.

O calor vem da queima dos resíduos e na reação da pilha. Algumas das conversões de calor (inversão de calor) não são facilmente recuperáveis.

Inversor

O inversor é responsável pela conversão da corrente contínua produzida no conjunto de células de combustível a corrente alternada, geralmente trifásica, nas especificações de tensão e frequência desejadas. Este pode funcionar de modo autônomo ou monitorado. Para instalações de célula de pequena potência, a corrente de saída será bifásica.

Bateria

A bateria armazena energia suficiente para carregar a máquina durante flutuações de carga encontradas durante serviços de carga de emergência (falta de energia) ou sem a operação da rede e para dar início à máquina sem eletricidade. A bateria não é usada quando a unidade está operando à uma potência de saída fixa (kW). A vida útil da bateria de 5 anos ou mais pode contudo ser esperada em instalações que funcionam principalmente em módulos constantes.

Controles e interface de utilidade

A interface de utilidade tem dois módulos, com rede e sem rede. No módulo com rede, o inversor encaminha a frequência e corrente em fase com a tensão para manter uma pré-determinada ou ajustável potência de saída.

Em módulos sem rede, o inversor mantém tensão e corrente de acordo com suas referências internas e satisfaz a potência real e reativa da carga de emergência por ajustá-la continuamente. O controle de tempo da capacidade pode ser apropriado em instalações sem rede.

Fornecimento de água e descarga

Metano e água entram no reformador como foi mencionado acima. Embora o reformador e a pilha produzam mais água do que é consumido, o projeto normal da célula necessita de um reservatório de água purificada. A unidade de purificação da Plug Power usa um processo de 3 fases: filtro de escala, osmose reversa e troca de íons. A necessidade de água varia diretamente com a potência de saída. Em 2,5 kW, a unidade PEM necessita de 0,19 m³ por dia de água pura e produz cerca de 0,38 m³ por dia de água não-pura.

Recuperação de calor

O reformador e a célula produzem eletricidade do gás natural com 24 a 26% de eficiência baseado no PCI do gás. Na maioria das instalações de cogeração, o calor produzido é transferido para um aquecedor de água doméstico. Quando a carga é satisfeita, a temperatura do tanque da base do tubo aproximará à temperatura de operação da célula (80°C). O calor produzido terá que ser descarregado pela água e pelo ar ambiente e a eficiência global será revertida para a eficiência da máquina como uma fonte de eletricidade.

3

Métodos Experimentais

3.1

Descrição da célula de combustível testada

Existem três principais componentes de uma célula de combustível: o processador de combustível que extrai hidrogênio do gás natural ou propano, a pilha da célula que converte hidrogênio em eletricidade e a unidade de potência que converte eletricidade produzida pela pilha em potência de alta qualidade que pode ser utilizada em casa.

O processador é formado por dois componentes: o reformador de combustível e a unidade de limpeza do monóxido de carbono. O reformador transforma o gás natural em um gás rico em hidrogênio chamado reformado. Em seguida, este reformado vai para a unidade de limpeza, onde o sistema reduz a quantidade de CO. Após deixar o reformador, ele entra na pilha, que é composta de várias células para produzir potência (kW). Posteriormente, o inversor transforma alta tensão DC em 120-240 volts AC. As dimensões médias desta unidade são 84" X 32" X 68", como vista na Fig. 9 a seguir.



Figura 9: Módulos de uma célula de combustível.

Os módulos da célula de combustível são:

1. Módulo de Processamento do Combustível → converte gás natural em hidrogênio.
2. Módulo de Geração de Potência → combina hidrogênio com ar para criar uma potência de corrente contínua (DC).
3. Módulo Eletrônico de Potência → converte a potência de corrente contínua em potência de corrente alternada para uso em aplicações residências ou comerciais.
4. Módulo de Estocagem de Energia → garante a continuidade de potência durante as mudanças do sistema.
5. Módulo de Gerenciamento Térmico → otimiza o desempenho do sistema e fornece calor para uso da célula.

Tabela 6: Informações Gerais

Desempenho	Características do produto	5C
	Taxa de Potência Contínua	5 kWe (9kWt)
	Potência de saída	2,5–5 kWe (3-9 kWt)
	Voltagem	120/240 V @ 60 Hz
	Qualidade da Potência	IEEE 519
	Emissões	
		SOx , 1ppm
		Ruído < 60 dBa @ 1metro
Condições de Operação	Instalação	Externa
	Instalação elétrica	Corrente em Paralelo
	Combustível	Gás Natural

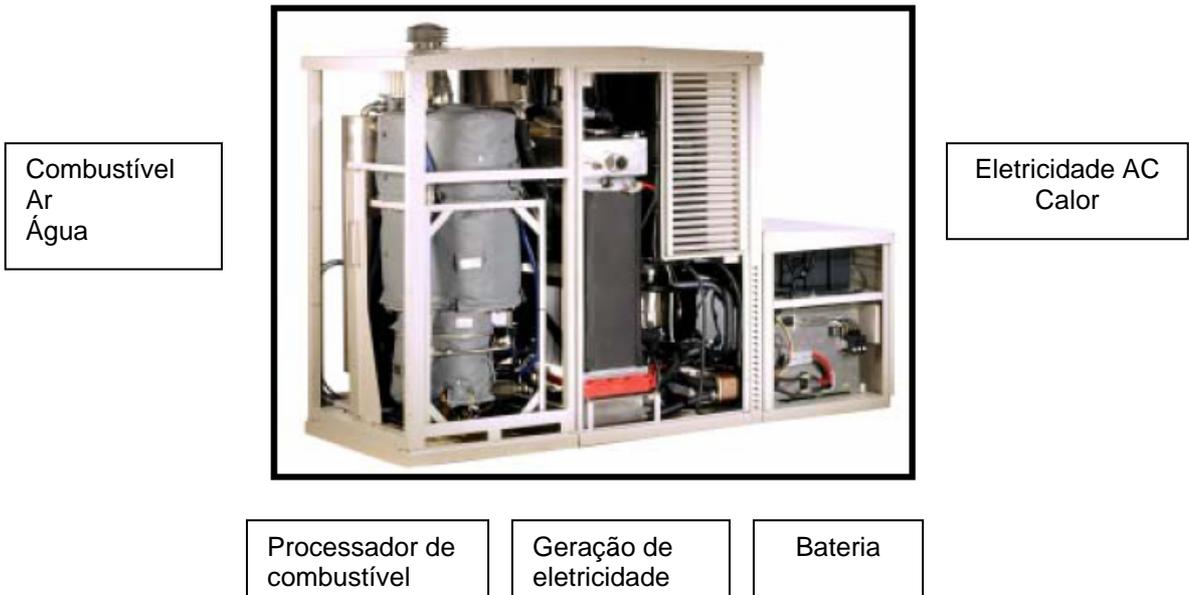


Figura 10: Sistema integrado.

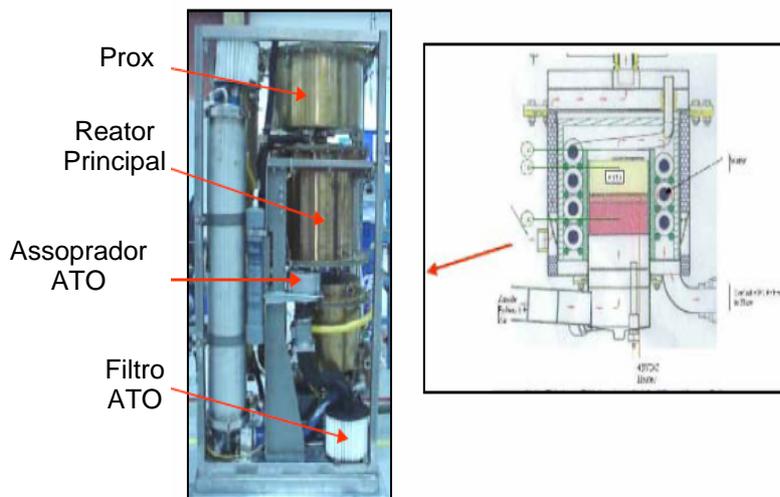


Figura 11: Processador de combustível.

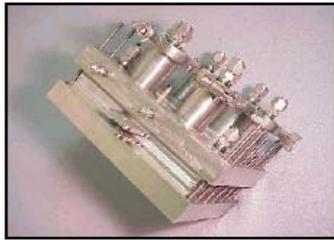


Figura 12: Geração de eletricidade – usa hidrogênio reformado para produzir eletricidade (corrente DC).



Figura 13: Bateria.

O inversor apresenta as seguintes funções:

- Converte a corrente que sai da pilha da DC para AC;
- Fornece eletricidade auxiliar;
- Fornece isolamento entre a pilha e a conexão AC;
- Fornece um sistema de controle de todas as estatísticas elétricas incluindo a tensão e a corrente da pilha.

3.2 Potencial da Cogeração

A célula de combustível instalada na PUC-Rio possui a capacidade de gerar calor para a cogeração. Este calor é produzido pela pilha (conjunto de 88 células de combustível) e pelo reformador de gás natural, durante a reforma. Quando um sistema para o aproveitamento desta energia térmica para cogeração não está instalado, um radiador rejeita calor para a atmosfera. Com a instalação de um sistema de cogeração para o aproveitamento da energia térmica, espera-se que a eficiência do sistema de célula de combustível (pilha e reformador) aumente sem que o sistema seja afetado.

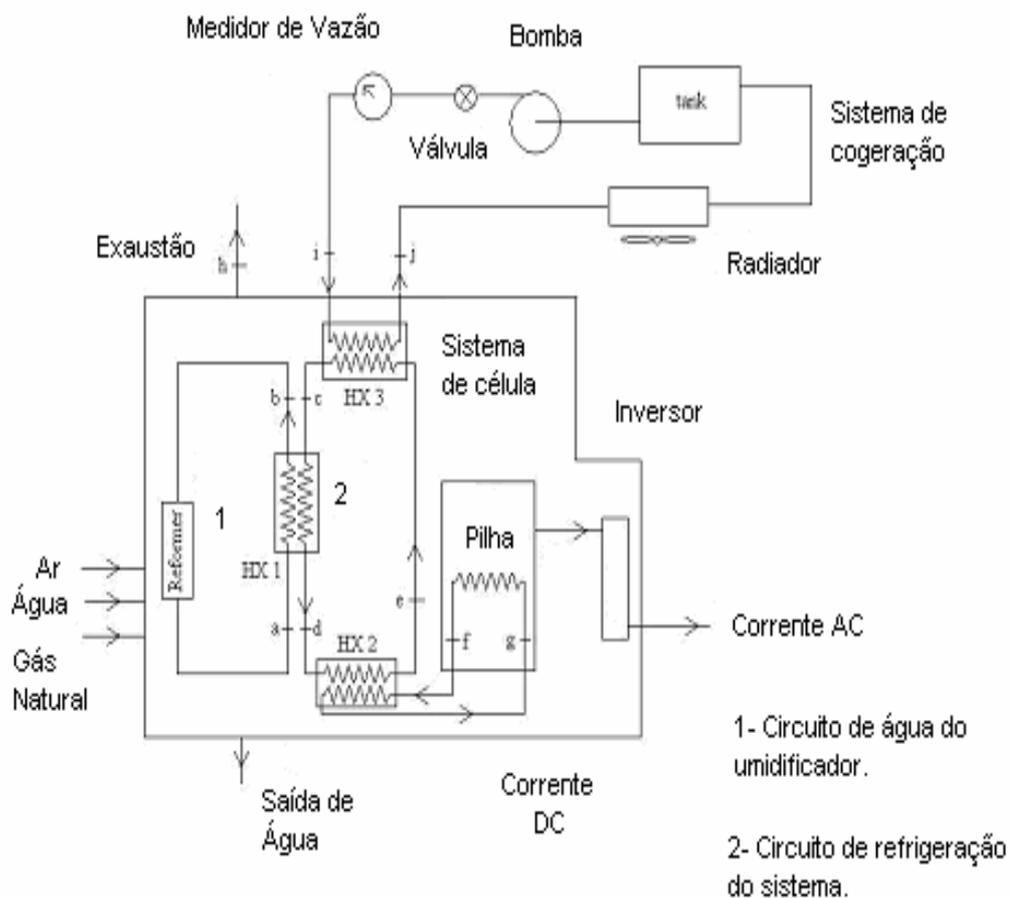


Figura 14: O esquema da cogeração na célula de combustível.

A Fig. 14 mostra um esquema básico da célula de combustível e dos trocadores de calor. A pilha rejeita calor que é aproveitado através da circulação de óleo térmico e rejeitado no trocador HX2. O calor nesse trocador de calor é

liberado para um circuito de propileno glicol e rejeitado no trocador HX3, onde se aproveita a energia para a cogeração. A água da cogeração, após ser aquecida, passa por um radiador com ventilador, de modo que possa haver uma dissipação da energia térmica, caso a água quente não possa ser utilizada. Esta passa para um tanque de armazenamento e a seguir, por uma bomba, que promove sua circulação. Um medidor de vazão é usado para controle. O calor proveniente da reforma do gás natural é liberado no trocador HX1, que contribui para a energia de cogeração. Todos os trocadores de calor são de corrente cruzada com fluidos misturados. A célula de combustível possui um relé de estado sólido, que é ligado quando está disponível a cogeração, assim pode ser ligada uma bomba, circulando a água. Também foi instalada uma chave contadora para que seja ligado o ventilador do radiador. Para o aproveitamento da energia da cogeração, construiu-se um sistema com uma bomba de 184 W, um medidor de vazão, um reservatório e dois medidores de temperatura tipo PT100. A vazão de água é regulada pela válvula, após a bomba. Um radiador automotivo foi instalado, para servir como sorvedouro de carga térmica. Assim, mediram-se as temperaturas de entrada e saída da água e a vazão de cogeração.

A célula de combustível é um conjunto formado pela pilha, onde estão 88 células, o reformador, onde se processa a produção de hidrogênio a partir do gás natural, e o inversor, que converte a corrente elétrica contínua, gerada pela célula em corrente alternada com 120 V.

Na produção de energia elétrica pela pilha, calor é gerado e recuperado através do trocador de calor HX2. Por esse trocador, circula óleo térmico. No reformador, com a quebra da molécula do gás natural para a produção de hidrogênio, calor também é gerado e recuperado no trocador HX1, que é um trocador de corrente cruzada com propileno glicol e água. As trocas de calor que ocorrem nos trocadores HX1 e HX2 são aproveitadas no trocador HX3, que é o trocador utilizado para o aquecimento de água na cogeração.

Para as medidas de capacidade da cogeração da célula, serão utilizados um circuito de água, um radiador de automóvel e uma bomba d'água. As temperaturas de entrada e saída da água no trocador HX3 serão medidas, bem como a vazão de água no hidrômetro. A vazão de água será regulada através de uma válvula de gaveta. O radiador funcionará como um sorvedouro de energia, representando o consumo de energia do usuário.



(a)

(b)

Figura 15: (a) Caixa d'água; (b) Instalação do hidrômetro.



(a)

(b)

Figura 16: (a) Bomba e (b) Entrada e saída da água da cogeração na célula de combustível.



Figura 17: O radiador como carga térmica.



Figura 18: O painel de disjuntores para a bomba d'água e para o ventilador do radiador.



Figura 19: O sistema de aquisição de dados.

O potencial de cogeração da célula pode ser estimado calculando o calor rejeitado pela pilha e pelo reformador, de acordo com os passos seguintes:

- Eficiência térmica da pilha (η_T), dada pela Eq. 24.
- Potência de saída DC.
- Energia química do hidrogênio (E_{H_2})

$$E_{H_2} = \frac{\dot{E}_{DC}}{\eta_T} \quad (32)$$

- Calor rejeitado para a atmosfera (Q_{rej}), Eq. 27.
- Vazão do gás natural (\dot{m}_{gas}).

- Poder calorífico inferior do gás (PCI).
- Energia química do gás (E_{gas}).

$$E_{gas} = \dot{m}_{gas} \cdot PCI_{gas} \quad (33)$$

- Porcentagem da energia química do gás usada na energia elétrica que sai da célula (η_G), dada pela Tab. 11.
- Porcentagem da energia química do gás rejeitada pela pilha em forma de calor (η_{pilha}).

$$\eta_{pilha} = \frac{Q_{rej}}{E_{gas}} \quad (34)$$

- Eficiência de conversão (η_{CE}).
- Percentual da energia química do gás perdida com a conversão DC/AC e auxiliares (η_{aux}).

$$\eta_{aux} = \frac{E_{DC}}{E_{gas}} \cdot (1 - \eta_{CE}) \quad (35)$$

- Porcentagem da energia química do gás rejeitada pelo reformador como calor (η_{ref}).

$$\eta_{ref} = 1 - \eta_G - \eta_{pilha} - \eta_{aux} \quad (36)$$

- Porcentagem da energia química do gás que pode ser usada em cogeração (η_{cog}).

$$\eta_{cog} = \eta_{pilha} + \eta_{ref} \quad (37)$$

3.3 Simulação da cogeração

Nesta seção, será mostrada a simulação de cogeração da célula de combustível.

Como foi explicado anteriormente, a célula está instrumentada com sensores de medidas de temperatura e vazão de gás natural. Entretanto, não se conhece a composição, a vazão dos gases, a vazão do óleo térmico que circula na pilha, a vazão de propileno glicol no circuito de resfriamento da célula e nem a vazão de água dos diversos circuitos do reformador e das diversas etapas de reforma do gás natural. Então, baseando-se no balanço de energia com a equação da primeira lei da termodinâmica e nas equações de transferência de calor, e dados medidos durante a operação da célula de combustível, formou-se um sistema de equações para a simulação da cogeração. Nesta simulação, foram calculadas as vazões de água no reformador e na cogeração, de propileno glicol e óleo térmico no interior da pilha.

As equações de conservação de massa e energia e as equações de transferência de calor para trocadores de calor considerando-se a efetividade de cada um, podem ser escritas como:

Trocador HX 1:

$$\dot{m}_{wH}c_{p_a}(T_b - T_a) = \dot{m}_p c_{p_p}(T_c - T_d) \quad (38)$$

$$\varepsilon_{HX1} = \frac{\dot{m}_{wH}c_{p_a}(T_a - T_b)}{\dot{m}_p c_{p_p}(T_a - T_c)} \quad (39)$$

Trocador HX 2:

$$-\dot{Q}_{st} = \dot{m}_o c_{p_o}(T_g - T_f) \quad (40)$$

$$\dot{m}_p c_{p_p}(T_d - T_e) = \dot{m}_o c_{p_o}(T_g - T_f) \quad (41)$$

$$\varepsilon_{HX2} = \frac{\dot{m}_o c_{p_o}(T_f - T_g)}{\dot{m}_p c_{p_p}(T_f - T_d)} \quad (42)$$

Trocador HX 3:

$$\dot{m}_a c_{p_a}(T_i - T_j) = \dot{m}_p c_{p_p}(T_c - T_e) \quad (43)$$

$$\varepsilon_{HX3} = \frac{\dot{m}_a c_{p_a} (T_j - T_i)}{\dot{m}_p c_{p_p} (T_e - T_i)} \quad (44)$$

Nas equações acima, c_{pa} , c_{pp} e c_{po} , são os calores específicos da água, propileno glicol e do óleo térmico, respectivamente; \dot{m}_a , \dot{m}_p , \dot{m}_o e \dot{m}_{wH} são as vazões mássicas da água da cogeração, do propileno glicol, do óleo térmico e da água no umidificador, respectivamente; ε_{HX1} , ε_{HX2} e ε_{HX3} são as efetividades dos respectivos trocadores de calor e \dot{Q}_{st} é a parcela de calor liberada ao óleo térmico pela pilha.

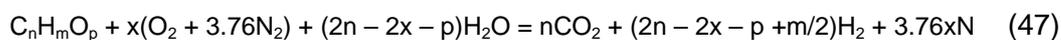
No Anexo II iremos apresentar os resultados do balanço de massa para o trocador de calor HX3, onde:

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{\dot{m}_q c_{p,q}}{\dot{m}_f c_{p,f}} \quad (45)$$

$$q_{\max} = C_{\min} (T_{q,e} - T_{f,e}) \quad (46)$$

3.4 Conversão de combustível

Equação geral para conversão de combustível: Considerando-se a variação da conversão de combustível do reformador de vapor (SR) para a oxidação parcial (PO), utilizou-se uma equação geral publicada pela ANL (Laboratório Nacional de Argonne) que descreve essa conversão. A equação geral é:



onde x é a razão molar de oxigênio por combustível. A composição molar do gás e o número de moles de hidrogênio podem ser encontrados nos Anexos I e II, respectivamente.

3.5

Descrição das grandezas medidas e dos instrumentos

A célula tipo PEM de 5kW foi fabricada pela Plug Power. O modelo é totalmente instrumentado. Possui sensores de temperatura, pressão, tensão e corrente, sendo todos os dados medidos a cada minuto e armazenados em um computador.

Para o estudo em regime permanente, os valores médios de todas as grandezas, como a taxa de vazão volumétrica e a potência de saída, são medidas. A pilha da célula e a unidade de controle do reformador (SARC) fornecem informações através de uma variedade de sensores.

Foi utilizado um hidrômetro, para a medida de vazão de água, e dois PT 100 para as medidas de temperatura de entrada e saída de água da célula de combustível. Os dados de temperaturas foram lidos através de um multímetro HP, num programa independente do programa da célula de combustível.

3.6

Desempenho

A célula de combustível é uma tecnologia relativamente nova. Pouco se conhece sobre sua vida em operação e eficiência em aplicações residenciais. A eficiência oscila na faixa de 34-40%.

Para proteger sua operação, a célula possui alguns sistemas de proteção que a desligam automaticamente (ver Anexo III).

3.7

Incerteza de medição

As variáveis medidas nesta experiência foram V_{exit} , Stack DC Power, Average AC Power, FS2 Fuel Flow, H_2 Stoich Calc, vazão de água da cogeração e suas temperaturas de entrada e saída.

A incerteza absoluta de cada quantidade independentemente medida foi estimada como U_j . As medições são empregadas para calcular resultados, r , para este estudo. Com isso, iremos analisar como os erros nos x_i s propagam-se no cálculo de r a partir dos valores medidos.

Em geral, R pode ser expresso matematicamente como $r = r(X_1, X_2, \dots, X_j)$.

Podemos representar a análise de incerteza através da equação:

$$Ur = \left[\left(\frac{\partial r}{\partial X_1} U_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial X_2} U_{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial r}{\partial X_j} U_{x_j} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (48)$$

onde,

$$U_{x_1} = (\sigma^2 + U_{x_1}^2)^{1/2} \quad (49)$$

sendo σ o desvio padrão e U_{x_1} a metade da incerteza da medição.

É comum no experimento encontrarmos alguns valores medidos que extrapolam a tendência dominante. Estes valores podem ser, de fato, medições erradas, como podem também representar certo fenômeno físico de interesse. Por este motivo, estes valores que fogem à tendência dominante não podem ser descartados sem recorrer a um critério consistente para sua eliminação.

Para aplicar o critério de Chauvenet para eliminar valores duvidosos, em primeiro lugar calcula-se o desvio médio e o desvio padrão do conjunto de dados medidos. O desvio de cada um dos pontos é comparado com o desvio padrão para assim se eliminar os pontos duvidosos. Se diversos pontos extrapolarem o critério-limite estabelecido, é provável que o sistema de instrumentação seja inadequado, ou que o processo sendo medido seja extremamente variável.

O critério de Chauvenet, então, fornece uma base consistente para tomar a decisão de excluir ou não um dado de um conjunto de valores medidos. Para sua aplicação, basta calcular a razão do desvio individual para o desvio padrão, ΔR , e comparar com um valor de referência, ΔR_0 . ΔR_0 depende do número de medidas, enquanto que ΔR é definida como:

$$\Delta R = (x_i - \bar{x}) / \sigma \quad (50)$$

O valor medido é rejeitado quando $\Delta R > \Delta R_0$.

- Com a Eq. 24 da eficiência térmica da pilha (η_T), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$U_{\eta_T} = \eta_T \times \frac{U_{V_{exit}}}{V_{exit}} \quad (51)$$

- Com a Eq. 26 da energia química do hidrogênio (E_{H_2}), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$U_{E_{H_2}} = E_{H_2} \times \left[\left(\frac{U_{DCPower}}{DCPower} \right)^2 + \left(\frac{U_{\eta_T}}{\eta_T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (52)$$

- Com a Eq. 27 do calor rejeitado (Q_{rej}), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$U_{Q_{rej}} = Q_{rej} \times \left[\left(\frac{U_{DCPower}}{DCPower} \right)^2 + \left(\frac{U_{\eta_T}}{\eta_T^2 \times \left(\frac{1}{\eta_T} - 1 \right)} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (53)$$

- Com a Eq. 28 da eficiência do reformador (η_R), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$U_{\eta_R} = \eta_R \times \left[\left(\frac{U_{Razão_{H_2}}}{Razão_{H_2}} \right)^2 + \left(\frac{U_{DCPower}}{DCPower} \right)^2 + \left(\frac{U_{Vazão_{H_2}}}{Vazão_{H_2}} \right)^2 + \left(\frac{U_{V_{exit}}}{V_{exit}} \right)^2 + \left(\frac{U_{PCI}}{PCI} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (54)$$

- Com a Eq. 30 da eficiência térmica global da célula (η_G), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$U_{\eta_G} = \eta_G \times \left[\left(\frac{U_{ACPower}}{ACPower} \right)^2 + \left(\frac{U_{E_{gás}}}{E_{gás}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (55)$$

- Com a Eq. 33 da energia química do gás (E_{gas}), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$U_{E_{gas}} = \left[\left(\frac{U_{Vazão_{H_2}}}{Vazão_{H_2}} \right)^2 + \left(\frac{U_{PCI}}{PCI} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (56)$$

- Com a Eq. 34 da percentagem da energia do gás rejeitada pela pilha (η_{pilha}), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$U_{\eta_{pilha}} = \left[\left(\frac{U_{Q_{rej}}}{Q_{rej}} \right)^2 + \left(\frac{U_{E_{gás}}}{E_{gás}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (57)$$

- Com a Eq. 35 do percentual de energia química do gás perdida com a conversão DC/AC e auxiliares (η_{aux}), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$U_{\eta_{aux}} = \left[\left(\frac{U_{DCPower}}{DCPower - ACPower} \right)^2 + \left(\frac{U_{ACPower}}{DCPower - ACPower} \right)^2 + \left(\frac{U_{E_{gás}}}{E_{gás}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (58)$$

- Com a Eq. 36 da percentagem da energia química do gás rejeitada pelo reformador como calor (η_{ref}), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$U_{\eta_{ref}} = \left[U_{\eta_G}^2 + U_{\eta_{pilha}}^2 + U_{\eta_{aux}}^2 \right]^{1/2} \quad (59)$$

- Com a Eq. 37 da percentagem da energia química do gás que pode ser usada em cogeração (η_{cog}), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$\eta_{cog} = \left[U_{\eta_{pilha}}^2 + U_{\eta_R}^2 \right]^{1/2} \quad (60)$$

- Com a Eq. 38 da quantidade de calor da cogeração (Q), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$Q = \left[\left(c_{p_a} \times (T_s - T_e) \times U_{m_a} \right)^2 + \left(\dot{m}_a \times c_{p_a} \times U_{T_s} \right)^2 + \left(\dot{m}_a \times c_{p_a} \times U_{T_e} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (61)$$

4

Resultados experimentais

4.1

Célula

Ao ser inicializada, a célula realiza várias operações, antes da energia elétrica ser gerada. Primeiramente, procedimentos de limpeza do gás dentro do reformador são realizados através dos assopradores. Como a célula está conectada em rede, é fornecida energia elétrica para o processo de start up.

A potência da célula de combustível foi selecionada em 2,5 kW. Cerca de 1,3 kW são fornecidos para o ar condicionado e para o computador que está conectado com a célula. O restante da energia é fornecido para o circuito elétrico da PUC-Rio.

Os testes foram realizados entre os dias 06 de novembro de 2004 e 05 de janeiro de 2006 para uma potência de 2,5 kW.

As Tab. 7, 8, 9 e 10 mostram o poder calorífico do gás durante os testes. Estes dados foram medidos pela CEG do Rio de Janeiro.

4.1.1

Poder Calorífico

Durante o período compreendido entre novembro de 2004 e janeiro de 2006, foram realizados e medidos testes para uma potência de 2,5 kW para o regime permanente. Os cálculos foram baseados no poder calorífico inferior (PCI) do gás medido pela CEG do Rio de Janeiro.

Na Tab. 7 estão as medidas para o PCS e PCI do gás obtidos em novembro de 2004.

Tabela 7: PCS e PCI do gás, à 20°C e 1 atm, obtidos em novembro de 2004.

Dia	PCS (kJ/Nm³)	PCI (kJ/Nm³)
6/11/2004	39.982	36.127
7/11/2004	39.771	35.931
8/11/2004	39.865	36.019
9/11/2004	39.872	35.978
10/11/2004	39.821	36.020
12/11/2004	39.868	36.020
13/11/2004	39.828	35.985
14/11/2004	39.787	35.945
16/11/2004	39.928	36.078
17/11/2004	40.013	36.158
27/11/2004	39.493	35.672
Média	39.839	35.994
Desvio	137	128
Variação (%)	0,34	0,36

Pode-se observar que o PCS e o PCI informados pela CEG variaram pouco no mês de novembro de 2004, cerca de 0,34% e 0,36%, respectivamente.

Em dezembro de 2004, foram obtidos os seguintes PCS e PCI do gás relacionados na Tab. 8.

Tabela 8: PCS e PCI do gás, à 20°C e 1 atm, obtidos em dezembro de 2004.

Dia	PCS (kJ/Nm³)	PCI (kJ/Nm³)
23/12/2004	39.283	35.475
24/12/2004	39.474	35.654
25/12/2004	39.597	35.769
26/12/2004	39.618	35.788
Média	39.493	35.672
Desvio	154	144
Variação (%)	0,39	0,40

Pode-se observar que o PCS e o PCI informados pela CEG variaram pouco no mês de dezembro de 2004, cerca de 0,39% e 0,40%, respectivamente.

Para dezembro de 2005, o PCS e o PCI do gás medidos estão relacionados na Tab. 9 a seguir.

Tabela 9 – PCS e PCI do gás, à 20°C e 1 atm, obtidos em dezembro de 2005.

Dia	PCS (kJ/Nm³)	PCI (kJ/Nm³)
15/12/2005	38.214	34.470
19/12/2005	38.807	35.024
20/12/2005	38.665	34.891
21/12/2005	40.028	36.164
22/12/2005	38.879	35.091
23/12/2005	38.678	34.903
26/12/2005	38.306	34.556
27/12/2005	38.267	34.520
28/12/2005	38.221	34.476
29/12/2005	38.255	34.508
30/12/2005	38.315	34.565
Média	38.603	34.833
Desvio	535	499
Variação (%)	1,39	1,43

Pode-se observar que o PCS e o PCI informados pela CEG no mês de dezembro de 2005 variaram mais que no mês de dezembro de 2004, cerca de 1,39% e 1,43%, respectivamente.

Em janeiro de 2006, o PCS e o PCI do gás medidos estão relacionados na Tab. 10 a seguir.

Tabela 10 – PCS e PCI do gás, à 20°C e 1 atm, obtidos em janeiro de 2006.

Dia	PCS (kJ/Nm³)	PCI (kJ/Nm³)
2/1/2006	38.630	34.859
3/1/2006	40.573	36.673
4/1/2006	39.120	35.317
5/1/2006	38.581	34.813
Média	39.226	35.416
Desvio	930	869
Variação (%)	2,37	2,45

Pode-se observar que o PCS e o PCI informados pela CEG no mês de janeiro de 2006 variaram, cerca de 2,37% e 2,45%, respectivamente.

No geral foram medidos PCS e PCI de 39258 kJ/Nm³ e 35448 kJ/Nm³, respectivamente, com valores inferiores aos medidos pelo estudo realizado pela PUC-Rio anteriormente de 39679 kJ/Nm³ e 35843 kJ/Nm³, respectivamente [30].

4.1.2

Eficiência térmica global da célula

Para cada teste, os valores médios de todas as medições, como vazão volumétrica e potência de saída, foram armazenados. A pilha e a unidade de controle do reformador (SARC) enviam informações sobre uma variedade de sensores que estão dentro da célula.

A eficiência térmica global medida na célula (η_G) se baseia no PCI do gás e pode ser calculada pela razão entre a energia elétrica de saída e a energia que entra do gás natural, Eq. 30. A eficiência térmica global ($\eta_{G,SARC}$) é calculada pelo SARC. A vazão de gás é expressa em litro normal por minuto (slm), nas condições padrões de 20°C e 1 atm.

A Tab. 11 mostra os resultados para novembro de 2004, utilizando o PCI do gás dado na Tab. 07. Também pode ser visto que a pilha e o controlador do reformador calculam sistematicamente um valor mais alto para a eficiência térmica global da célula. Provavelmente por causa de um PCI fixo do gás que é suposto nos cálculos mais baixo que o medido. A energia gerada pelo gerador (pilha) atende prioritariamente a uma carga especificada pelo usuário chamada de carga prioritária. A diferença em relação ao que é gerado é introduzida na rede interna da PUC-Rio.

Tabela 11 – Eficiência térmica global da célula (η_G) para 2,5 kW em novembro de 2004.

Dia	AC Output Power (kW)	Vazão de gás (SLM)	η_G (%)	$\eta_{G,SARC}$
6/11/2004	2,55	18,91	22,5	22,34
7/11/2004	2,55	18,99	22,4	22,48
8/11/2004	2,41	18,54	21,7	21,61
9/11/2004	2,47	18,76	22,0	21,98
10/11/2004	2,47	19,15	21,6	21,51
12/11/2004	2,49	19,62	21,2	21,03
13/11/2004	2,50	19,77	21,1	21,11
14/11/2004	2,48	19,90	20,9	20,99
16/11/2004	2,47	20,51	20,1	20,09
17/11/2004	2,48	21,37	19,3	19,13
27/11/2004	2,47	20,36	20,5	20,57
Média	2,49	19,63	21,21	21,17
Desvio	0,04	0,87	0,98	0,99
Variação (%)	1,57	4,42	4,62	4,68

A eficiência global variou 4,62% no mês de novembro de 2004 devido às variações nas vazões de gás de 4,42%.

Pode-se observar que a η_G ficou bem perto da $\eta_{G, SARC}$ significando uma boa confiabilidade dos dados.

Para dezembro de 2004, a eficiência global da célula (η_G), utilizando o PCI do gás da Tab. 8, é mostrada na Tab. 12 a seguir.

Tabela 12 – Eficiência térmica global da célula (η_G) para 2,5 kW em dezembro de 2004.

Dia	AC Output Power (kW)	Vazão de gás (SLM)	η_G (%)	$\eta_{G, SARC}$
23/12/2004	2,55	19,39	22,3	23,30
24/12/2004	2,55	19,28	22,3	22,26
25/12/2004	2,54	19,34	22,1	23,24
26/12/2004	2,53	19,33	22,0	23,10
Média	2,54	19,34	22,2	22,98
Desvio	0,01	0,05	0,15	0,48
Variação (%)	0,38	0,23	0,68	2,11

A eficiência global variou 0,68% no mês de dezembro de 2004 devido às variações nas potências de saída AC de 0,38%.

Pode-se observar que a unidade de controle do reformador (SARC) calcula um valor maior em cerca de 3% do que o medido para a eficiência térmica global da célula. Provavelmente, por causa do valor fixo do PCI do gás empregado nos cálculos, um pouco abaixo do medido.

Para dezembro de 2005, a eficiência global da célula (η_G), utilizando o PCI do gás da Tab. 9, é mostrada na Tab. 13 a seguir.

Tabela 13 – Eficiência térmica global da célula (η_G) para 2,5 kW em dezembro de 2005.

Dia	AC Output Power (kW)	Vazão de gás (SLM)	η_G (%)	$\eta_{G, SARC}$
15/12/2005	2,54	18,75	23,7	25,69
19/12/2005	2,50	18,09	23,7	26,18
20/12/2005	2,50	18,27	23,4	26,02
21/12/2005	2,67	20,03	22,5	24,60
22/12/2005	2,49	17,90	23,8	26,14
23/12/2005	2,53	18,14	23,5	26,02
26/12/2005	2,50	18,60	23,4	26,01
27/12/2005	2,51	19,20	22,0	25,85
28/12/2005	2,48	19,08	22,5	26,49
29/12/2005	2,50	19,38	22,5	25,77
30/12/2005	2,55	19,35	22,2	25,71
Média	2,52	18,80	23,0	25,86
Desvio	0,05	0,67	0,68	0,48
Variação (%)	2,09	3,55	2,94	1,85

A eficiência global variou 2,94% no mês de dezembro de 2005 devido às variações nas vazões de gás de 3,55%.

Pode-se observar que a unidade de controle do reformador (SARC) calcula um valor maior em cerca de 11% do que o medido para a eficiência térmica global da célula. Provavelmente, por causa do valor fixo do PCI do gás empregado nos cálculos, um pouco abaixo do medido. A eficiência aumentou 4% em relação a dezembro de 2004 devido à troca da pilha.

Para janeiro de 2006, a eficiência global da célula (η_G), utilizando o PCI do gás da Tab. 10, é mostrada na Tab. 14 a seguir.

Tabela 14 – Eficiência térmica global da célula (η_G) para 2,5 kW em janeiro de 2006.

Dia	AC Output Power (kW)	Vazão de gás (SLM)	η_G (%)	$\eta_{G, SARC}$
2/1/2006	2,50	19,76	21,8	25,51
3/1/2006	2,48	19,71	20,7	25,42
4/1/2006	2,48	20,44	20,7	25,24
5/1/2006	2,48	21,00	20,5	25,33
Média	2,49	20,23	20,93	25,38
Desvio	0,01	0,61	0,59	0,12
Variação (%)	0,40	3,03	2,82	0,46

A eficiência global variou 2,82% no mês de janeiro de 2006 devido às variações nas vazões de gás de 3,03% e nas variações de 0,40% de eletricidade gerada.

Pode-se observar que a unidade de controle do reformador (SARC) calcula um valor maior em cerca de 18% do que o medido para a eficiência térmica global da célula. Provavelmente, por causa do valor fixo do PCI do gás empregado nos cálculos, um pouco abaixo do medido.

No geral foram medidas potências AC de 2,5 kW, 19,36 slm de vazão de gás, 22,0% de η_G e 23,36% de $\eta_{G, SARC}$. No estudo realizado pela PUC-Rio anteriormente foi encontrado uma η_G de 25,9% devido à uma vazão menor de gás de 16,3 slm.

A Fig. 20 ilustra a variação no tempo da eficiência elétrica da célula de combustível utilizada no experimento.

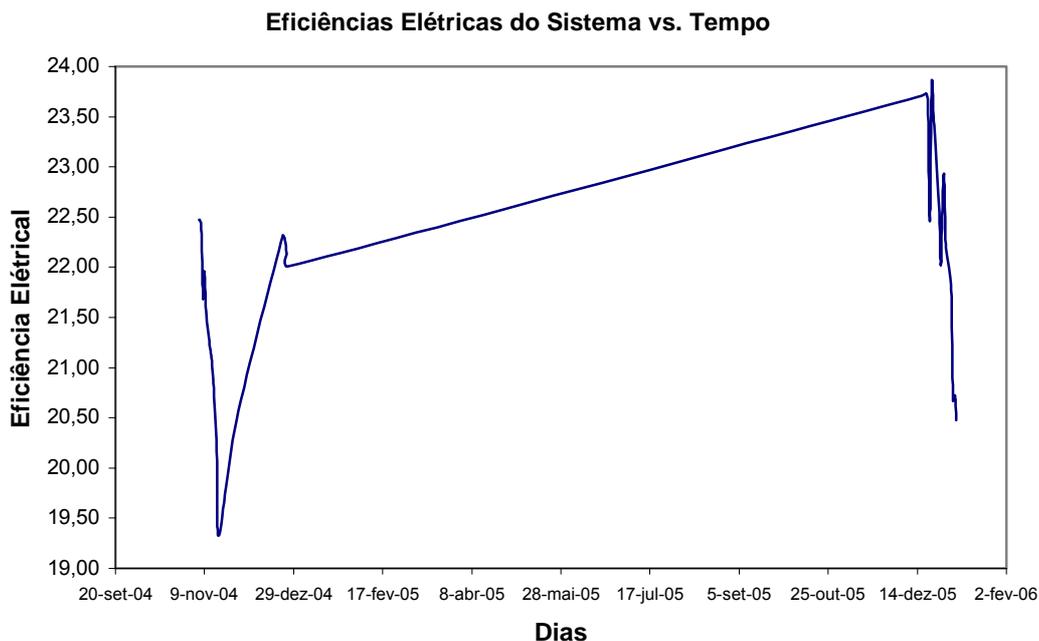


Figura 20: Gráfico da eficiência elétrica da célula no tempo.

Com isso, pode-se verificar que a eficiência global da célula variou de 19,3% a 23,8% sendo consideravelmente menor que a eficiência global nominal de uma célula PEM (40% a 50%) [25]. Contudo, deve-se ter cuidado em comparar as eficiências medidas aqui baseadas no PCI do gás natural que produz corrente AC e as calculadas com base no PCS do gás. Outra observação importante é que na prática, as contribuições do reformador para converter o gás natural em hidrogênio e do inversor para converter a corrente DC em corrente AC reduzem significativamente a eficiência elétrica da célula. Em outros estudos [26-29], por exemplo, foram relatadas eficiências globais entre 20% e 30%. Com isso, o uso da energia elétrica gerada pela célula seria insuficiente para justificar um investimento inicial. Conseqüentemente, a viabilidade econômica da célula em aplicações residenciais sempre dependerá da fração útil do calor gerado pela célula considerando a carga térmica necessária para o ambiente (água quente e aquecimento).

Pode-se verificar que de acordo com o Anexo II, a eficiência da célula ficou maior ao se considerar a carga térmica.

4.1.3

Eficiência térmica

A eficiência térmica da pilha (η_T) está relacionada com a entrada de hidrogênio [21], ou seja, pode ser calculada pela razão entre tensão de saída da célula (V_{exit}) e a energia do hidrogênio que entra conforme Eq. 24.

Os resultados de novembro de 2004 são mostrados na Tab. 15.

Tabela 15 - Eficiência térmica da pilha (η_T) em novembro de 2004.

Dia	V_{exit} (V)	η_T (%)
6/11/2004	0,70	47,4
7/11/2004	0,70	47,3
8/11/2004	0,70	47,3
9/11/2004	0,69	46,4
10/11/2004	0,68	45,6
12/11/2004	0,66	44,5
13/11/2004	0,66	44,5
14/11/2004	0,66	44,3
16/11/2004	0,63	42,6
17/11/2004	0,62	41,6
27/11/2004	0,65	43,9
Média	0,67	45,0
Desvio	0,03	1,95
Varição (%)	4,22	4,34

A eficiência térmica em relação ao H₂ variou 4,34% devido à variação de 4,22% na tensão gerada no mês de novembro de 2004.

Para dezembro de 2004, os resultados são mostrados na Tab. 16.

Tabela 16 - Eficiência térmica da pilha (η_T) em dezembro de 2004.

Dia	V_{exit} (V)	η_T (%)
23/12/2004	0,68	45,9
24/12/2004	0,68	45,7
25/12/2004	0,68	45,8
26/12/2004	0,67	45,4
Média	0,68	45,7
Desvio	0,01	0,22
Varição (%)	0,74	0,47

A eficiência térmica em relação ao H₂ variou 0,47% devido à variação de 0,74% na tensão gerada no mês de dezembro de 2004.

Para dezembro de 2005, os resultados para são mostrados na Tab. 17.

Tabela 17 - Eficiência térmica da pilha (η_T) em dezembro de 2005.

Dia	V_{exit} (V)	η_T (%)
15/12/2005	0,72	48,6
19/12/2005	0,73	49,3
20/12/2005	0,73	49,2
21/12/2005	0,73	49,1
22/12/2005	0,73	49,3
23/12/2005	0,73	49,2
26/12/2005	0,72	48,9
27/12/2005	0,72	48,8
28/12/2005	0,72	48,7
29/12/2005	0,73	49,1
30/12/2005	0,72	48,9
Média	0,73	49,0
Desvio	0,01	0,24
Variação (%)	0,72	0,50

A eficiência térmica em relação ao H_2 variou 0,50% devido à variação de 0,72% na tensão gerada no mês de dezembro de 2005.

Pode-se comprovar que, após a substituição de algumas peças da célula que estavam causando uma diminuição na eficiência térmica devido à degradação no mês de dezembro de 2004, houve um aumento na eficiência térmica no mês de dezembro de 2005.

Para janeiro de 2006, os resultados são mostrados na Tab. 18.

Tabela 18 - Eficiência térmica da pilha (η_T) em janeiro de 2006.

Dia	V_{exit} (V)	η_T (%)
2/1/2006	0,72	48,6
3/1/2006	0,72	48,4
4/1/2006	0,72	48,3
5/1/2006	0,72	48,5
Média	0,72	48,5
Desvio	0,00	0,13
Variação (%)	0,00	0,27

A eficiência térmica em relação ao H_2 variou 0,27% no mês de Janeiro de 2006.

No geral foi medida uma tensão gerada de 0,7 V e com isso calculada uma eficiência térmica de 47,0%. No estudo realizado na PUC-Rio anteriormente foi calculada uma eficiência térmica de 49,3% devido à um tensão gerada de 0,73 V.

Pode-se comprovar que após um mês de funcionamento a célula já apresentou uma diminuição na eficiência térmica devido à degradação. Após substituição da pilha a taxa de degradação foi reduzida significativamente.

4.1.4

Eficiência de conversão

A eficiência de conversão (η_{CE}) pode ser calculada utilizando as potências AC e DC medidas.

Os resultados para novembro de 2004 são mostrados na Tab. 19.

Tabela 19 - Eficiência de conversão (η_{CE}) em novembro de 2004.

Dia	AC Power (kW)	DC Power (kW)	η_{CE} (%)
6/11/2004	2,55	3,32	77,1
7/11/2004	2,55	3,30	77,3
8/11/2004	2,41	3,14	76,9
9/11/2004	2,47	3,21	77,1
10/11/2004	2,47	3,21	77,1
12/11/2004	2,49	3,23	77,2
13/11/2004	2,50	3,23	77,4
14/11/2004	2,48	3,21	77,4
16/11/2004	2,47	2,21	77,2
17/11/2004	2,48	3,21	77,4
27/11/2004	2,47	3,22	77,0
Média	2,49	3,14	77,2
Desvio	0,04	0,31	0,17
Varição (%)	1,57	9,91	0,22

A eficiência de conversão variou 0,22% devido à uma variação de 9,91% da potência DC no mês de novembro de 2004.

Os resultados para dezembro de 2004 são mostrados na Tab. 20.

Tabela 20 - Eficiência de conversão (η_{CE}) em dezembro de 2004.

Dia	AC Power (kW)	DC Power (kW)	η_{CE} (%)
23/12/2004	2,55	3,29	77,6
24/12/2004	2,55	3,28	77,7
25/12/2004	2,54	3,29	77,7
26/12/2004	2,53	3,27	77,6
Média	2,54	3,28	77,7
Desvio	0,01	0,01	0,06
Varição (%)	0,38	0,29	0,07

A eficiência de conversão variou 0,07% devido à uma variação de 0,36% da potência AC no mês de dezembro de 2004.

Para dezembro de 2005, os resultados são mostrados na Tab. 21.

Tabela 21 - Eficiência de conversão (η_{CE}) em dezembro de 2005.

Dia	AC Power (kW)	DC Power (kW)	η_{CE} (%)
15/12/2005	2,55	3,34	76,5
19/12/2005	2,51	3,28	76,3
20/12/2005	2,49	3,28	76,4
21/12/2005	2,68	2,67	75,7
22/12/2005	2,49	3,30	75,7
23/12/2005	2,54	3,31	76,6
26/12/2005	2,51	3,30	76,1
27/12/2005	2,52	3,36	74,9
28/12/2005	2,46	3,28	75,1
29/12/2005	2,51	3,37	74,6
30/12/2005	2,56	3,36	76,0
Média	2,53	3,26	75,8
Desvio	0,06	0,20	0,7
Variação (%)	2,28	6,09	0,9

A eficiência de conversão variou 0,9% devido à uma variação de 6,09% da potência DC no mês de dezembro de 2005.

Para janeiro de 2006, os resultados são mostrados na Tab. 22.

Tabela 22 - Eficiência de conversão (η_{CE}) em janeiro de 2006.

Dia	AC Power (kW)	DC Power (kW)	η_{CE} (%)
2/1/2006	2,50	3,31	75,7
3/1/2006	2,49	3,32	75,1
4/1/2006	2,49	3,35	74,4
5/1/2006	2,49	3,34	74,6
Média	2,49	3,33	75,0
Desvio	0,01	0,02	0,58
Variação (%)	0,20	0,55	0,77

A eficiência de conversão variou 0,77% devido à uma variação de 0,55% da potência DC no mês de janeiro de 2006.

No geral foram medidas potência AC e DC de 2,51 kW e 3,23 kW, respectivamente, e uma eficiência de conversão de 75,0%. No estudo realizado na PUC-Rio anteriormente obteve-se uma eficiência de conversão de 80,0%.

Pode ser observado que a eficiência de conversão DC/AC diminuiu devido à degradação do inversor, que não foi substituído.

A eficiência do inversor de corrente está muito abaixo das normalmente encontradas no mercado. Valores superiores a 90% [19] são factíveis para este tipo de equipamento.

Se considerássemos uma eficiência de inversão de 90%, a eficiência da pilha com reformador passaria de 22% para 25,6% - base PCI – um aumento de mais de 16%, mas ainda muito baixa para torná-la competitiva com um motor de combustão a gás.

4.1.5

Eficiência do reformador

Finalmente, a eficiência do reformador (η_R) pode ser calculada pela Eq. 28, utilizando a razão entre a energia química do hidrogênio produzido e a energia química do gás natural, consumido no reformador.

Os resultados para novembro de 2004 estão na Tab. 23.

Tabela 23 - Eficiência do Reformador (η_R) em novembro de 2004.

Dia	$m_{H_2, R} / m_{H_2, u}$	η_R (%)
6/11/2004	1,34	67,6
7/11/2004	1,34	67,6
8/11/2004	1,51	74,0
9/11/2004	1,34	67,5
10/11/2004	1,34	67,6
12/11/2004	1,34	67,9
13/11/2004	1,34	67,4
14/11/2004	1,34	67,1
16/11/2004	1,34	67,3
17/11/2004	1,37	67,8
27/11/2004	1,37	68,1
Média	1,36	68,2
Desvio	0,05	1,95
Varição (%)	3,74	2,86

A eficiência do reformador variou 2,86% devido à uma variação de 3,74% de $m_{H_2, R} / m_{H_2, u}$.

Para dezembro de 2004, os resultados obtidos foram os seguintes:

Tabela 24 - Eficiência do Reformador (η_R) em dezembro de 2004.

Dia	$m_{H_2, R} / m_{H_2, u}$	η_R (%)
23/12/2004	1,24	63,9
24/12/2004	1,24	64,0
25/12/2004	1,24	63,5
26/12/2004	1,24	63,8
Média	1,24	63,8
Desvio	0,00	0,22
Varição (%)	0,00	0,34

A eficiência do reformador variou 0,34% devido à uma variação de 0,40% do PCI do gás.

Para dezembro de 2005, os resultados obtidos foram os seguintes:

Tabela 25 - Eficiência do Reformador (η_R) em dezembro de 2005.

Dia	$m_{H_2, R} / m_{H_2, u}$	η_R (%)
15/12/2005	1,24	65,0
19/12/2005	1,24	64,3
20/12/2005	1,27	64,9
21/12/2005	1,39	69,4
22/12/2005	1,24	65,1
23/12/2005	1,24	63,5
26/12/2005	1,24	64,1
27/12/2005	1,24	61,5
28/12/2005	1,32	67,0
29/12/2005	1,24	62,8
30/12/2005	1,24	60,9
Média	1,26	64,4
Desvio	0,05	2,39
Variação (%)	3,85	3,71

A eficiência do reformador variou 3,71% devido à uma variação de 3,85% de $m_{H_2, R} / m_{H_2, u}$.

Pode-se observar que mesmo trocando os catalisadores do reformador houve uma degradação porque não foi instalado o redutor de enxofre (importante para o gás brasileiro que possui uma concentração de 70 mg/m³ de enxofre de acordo com a norma da ANP n° 104).

Para janeiro de 2006, os resultados obtidos foram os seguintes:

Tabela 26 - Eficiência do Reformador (η_R) em janeiro de 2006.

Dia	$m_{H_2, R} / m_{H_2, u}$	η_R (%)
2/1/2006	1,27	61,9
3/1/2006	1,24	58,1
4/1/2006	1,24	58,9
5/1/2006	1,26	58,9
Média	1,25	59,4
Desvio	0,02	1,68
Variação (%)	1,20	2,82

A eficiência do reformador variou 2,82% devido à uma variação de 1,20% de $m_{H_2, R} / m_{H_2, u}$.

No geral foi calculada uma eficiência de reforma de 50,9%, inferior à encontrada na literatura (75% a 90%), devido à uma média de 1,29 de $m_{H_2, R} / m_{H_2, u}$. No estudo realizado anteriormente na PUC-Rio foi calculada uma eficiência de reforma de 64,5% e uma média de 1,2 de $m_{H_2, R} / m_{H_2, u}$.

4.1.6

Potencial de cogeração

Na Tab. 27 estão relacionadas as seguintes eficiências:

Tabela 27 – Potencial de cogeração medido nesse estudo.

	Unidade	Valores Obtidos
η_T	%	47,0
E_{gas}	kW	11,5
η_G	%	22,0
η_{pilha}	%	32,4
η_{aux}	%	6,8
η_{ref}	%	38,9
η_{cog}	%	71,3

No estudo anterior [30] foram obtidas as seguintes eficiências:

Tabela 28 – Potencial de cogeração medido em março de 2003.

	Unidade	Valores Obtidos
η_T	%	49,3
E_{gas}	kW	9,74
η_G	%	25,9
η_{pilha}	%	33,8
η_{aux}	%	6,6
η_{ref}	%	33,7
η_{cog}	%	67,5

Pode-se observar que as eficiências η_T e η_G diminuíram devido à degradação. A eficiência da pilha diminuiu devido a um aumento da energia química do gás. Conseqüentemente, a energia química do gás rejeitada pelo reformador em forma de calor foi maior devido à uma baixa eficiência global e da pilha. Com a carga térmica o aproveitamento da energia química do gás aumentou bastante, ficando em 70%.

Neste estudo, foram encontrados os seguintes resultados:

Tabela 29: Informações gerais

Eficiência Global (kW_e/PCI)	22%
Aproveitamento ($(kW_e+kW_{th})/PCI$)	69%
Uso do combustível (PCI kJ/hr)	40515

4.1.7

Degradação da célula de combustível (2,5 kW)

Tabela 30 – Comparação de desempenho ao longo do tempo.

Parâmetro	Unidade	Símbolo	Nov/04	Dez/04	Dif.
Eficiência térmica teórica (do H ₂)	%	η_{TH}	82,3	82,3	0,0
Eficiência térmica (do H ₂)	%	η_T	45,0	45,7	0,7
Energia do gás (PCI)	kW	E_{gas}	11,8	11,5	-0,3
Energia do H ₂ gerado (PCI)	kW	$E_{H_2,gen}$	9,8	8,9	-0,8
Eficiência do reformador	%	η_R	68,2	63,8	-4,4
Eficiência de conversão	%	η_{CE}	77,2	77,7	0,5
Eficiência térmica (do gás)	%	η_G	21,2	22,2	1,0
Energia H ₂ (PCS), utilizada	kW	E_{H_2}	7,2	7,2	0,0
Calor rejeitado da célula	kW	Q_{rej}	4,0	3,9	0,0
Calor rejeitado (% gás)	%	η_{pilha}	33,5	33,9	0,5
Energia perdida auxiliar (% gás)	%	η_{aux}	6,3	6,4	0,1
Energia rej. do reform. (% gás)	%	η_{ref}	39,1	37,5	-1,6
Energia para cogeração (% gás)	%	η_{cog}	72,5	71,4	-1,1
Tensão da célula	V	V_{exit}	0,7	0,7	0,0
Consumo específico	Nm ³ /kWh	CE	0,5	0,5	0,0

Com diferenças justificadas pela incerteza de medição, uma análise da Tab. 30 mostra que a eficiência térmica entre nov/04 e dez/04, tanto a partir do hidrogênio como do gás natural, permaneceu constante; o mesmo aconteceu para o calor rejeitado pela célula, bem como para a energia disponível para cogeração, a tensão na célula, a energia rejeitada do reformador como calor e o consumo específico de combustível. Com isso, foi mostrado que não houve uma degradação da célula entre esses dois meses.

Pode-se também ser observado que a eficiência de conversão DC/AC permaneceu constante.

Tabela 31 – Comparação de desempenho ao longo do tempo.

Parâmetro	Unidade	Símbolo	Dez/05	Jan/06	Dif.
Eficiência térmica teórica (do H2)	%	η_{TH}	82,3	82,3	0,0
Eficiência térmica (do H2)	%	η_T	49,0	48,5	-0,5
Energia do gás (PCI)	kW	E _{gas}	11,0	11,9	0,9
Energia do H2 gerado (PCI)	kW	E _{H2,gen}	8,6	8,6	0,0
Eficiência do reformador	%	η_R	64,4	59,4	-5,0
Eficiência de conversão	%	η_{CE}	75,8	74,9	-0,9
Eficiência térmica (do gás)	%	η_G	23,0	20,9	-2,1
Energia H2 (PCS),utilizada	kW	E _{H2}	6,8	6,9	0,1
Calor rejeitado da célula	kW	Q _{rej}	3,5	3,5	0,0
Calor rejeitado (% gás)	%	η_{stack}	31,6	29,7	-1,9
Energia perdida auxiliar (% gás)	%	η_{aux}	7,3	7,0	-0,4
Energia rej. do reform. (% gás)	%	η_{ref}	38,0	42,4	4,4
Energia para cogeração (% gás)	%	η_{cog}	69,6	72,1	2,5
Tensão da célula	V	V _{exit}	0,7	0,7	-0,1
Consumo específico	Nm ³ /kWh	CE	0,4	0,5	0,0

Uma análise da Tab. 31 mostra que a eficiência térmica, tanto a partir do hidrogênio como do gás natural, diminuiu. Ao mesmo tempo, a energia disponível para cogeração aumentou. A energia rejeitada pelo reformador em forma de calor aumentou. Com isso, foi mostrado que houve uma degradação da célula entre esses dois meses, devida normalmente, à presença de CO no sistema.

Pode-se também ser observado que a eficiência de conversão DC/AC diminuiu.

4.1.8

Resultado de incerteza de medição

Tabela 32 – Resultado de incerteza de medição

Data	U_{η_T} (%)	U_{EH2} (kW)	U_{Qrej} (kW)	$U_{\eta_{Reformador}}$ (%)	U_{η_G} (%)	U_{Egas}	$U_{\eta_{pilha}}$ (%)	$U_{\eta_{aux}}$ (%)	$U_{\eta_{ref}}$ (%)	$U_{\eta_{cog}}$ (%)	Q (kW)
6/11/2004	0,80	0,14	0,12	1,64	0,87	0,39	1,23	0,51	1,61	0,49	
7/11/2004	0,37	0,14	0,09	1,72	0,95	0,40	0,97	0,76	1,67	0,54	
8/11/2004	0,82	0,17	0,14	1,82	0,96	0,38	1,33	0,79	1,81	0,45	
9/11/2004	0,73	0,15	0,12	1,51	0,86	0,37	1,16	0,64	1,53	0,36	
10/11/2004	1,10	0,21	0,18	2,06	1,00	0,47	1,85	0,70	2,47	0,77	
12/11/2004	0,57	0,13	0,10	1,61	0,85	0,41	1,07	0,55	1,50	0,47	
13/11/2004	0,43	0,10	0,08	1,59	0,82	0,41	0,89	0,48	1,32	0,46	
14/11/2004	0,74	0,14	0,13	1,73	0,83	0,42	1,23	0,48	1,59	0,48	
16/11/2004	1,21	0,25	0,22	1,94	0,84	0,41	1,94	0,70	2,25	0,38	
17/11/2004	1,22				0,93			0,71	2,64	0,68	
27/11/2004	1,13	0,23	0,20	2,04	0,88	0,48	1,89	0,59	2,43	0,68	
23/12/2004	0,47	0,09	0,08	1,43	0,82	0,37	0,82	0,46	1,13	0,36	
24/12/2004	0,67	0,12	0,11	1,59	0,86	0,40	1,13	0,44	1,49	0,50	
25/12/2004	0,64	0,11	0,10	1,56	0,84	0,39	1,05	0,44	1,37	0,45	
26/12/2004	0,62	0,12	0,10	1,62	0,87	0,41	1,11	0,48	1,53	0,52	
15/12/2005	0,53	0,11	0,08	1,54	0,92	0,37	0,95	0,56	1,43	0,51	1,64
19/12/2005	0,46	0,11	0,08	1,80	1,01	0,42	1,09	0,76	1,91	0,78	2,29
20/12/2005	1,23	0,20	0,18	1,87	0,98	0,37	1,78	0,77	2,23	0,56	1,92
21/12/2005	0,72	0,16	0,12	1,90	0,89	0,43	1,21	0,66	1,86	0,61	
22/12/2005	0,40	0,15	0,09	1,62	0,87	0,32	0,86	0,83	1,43		1,13
23/12/2005	0,54	0,09	0,08	1,65	0,94	0,39	0,99	0,50	1,55	0,63	
26/12/2005	0,75	0,20	0,13	1,79	0,83	0,34	1,24	0,88	1,77		1,14
27/12/2005	0,67	0,12	0,10	1,99	0,88	0,39	1,04	0,56	1,47	0,49	6,62
28/12/2005	0,76	0,11	0,11	1,72	0,85	0,38	1,10	0,41	1,40	0,49	7,71
29/12/2005	0,72	0,13	0,11	1,94	0,93	0,39	1,13	0,60	1,57	0,53	0,98
30/12/2005	0,47	0,07	0,07	1,36	0,71	0,36	0,64		0,76	0,22	
2/1/2006	0,67	0,13	0,10	1,63	0,84	0,39	1,04	0,54	1,45	0,47	0,47
3/1/2006	0,47	0,13	0,09	1,81	0,86	0,42	0,90	0,68	1,47	0,48	2,39
4/1/2006	0,48	0,14	0,09	2,21			1,26	0,91	2,24	0,93	1,32
5/1/2006	0,70	0,13	0,11	1,91	0,84	0,44	1,07	0,51	1,53	0,55	1,08
Média	0,70	0,14	0,11	1,74	0,88	0,40	1,17	0,62	1,68	0,53	2,39
Desv	0,25	0,04	0,04	0,20	0,06	0,03	0,32	0,14	0,42	0,14	2,31

Uma análise da Tab. 32 mostra que as incertezas ocorreram devido ao fato de a vazão de hidrogênio ser estimada pela célula e não calculada. Outro ponto relevante é a variação do PCI que não foi considerada e sim calculada uma média.

A vazão de água na cogeração não foi variada constantemente, ou seja, com um delta permanente, gerando uma certa imprecisão nos dados. Outro ponto é a baixa temperatura de entrada do propileno glicol no trocador de calor da cogeração (HX3).

4.1.9

Comparação com outros estudos [31]

Tabela 33 – Comparação com outros estudos

	AC Output Power (kW)	Vazão de gás (SLM)	η_G (%)	$\eta_{G, SARC}$ (%)
PUC-Rio	2,5	18,91	22,5	22,3
Cherry Point Naval air Base	2,0	11,1	12,4	12,1
CERL	2,4	6,5	24,3	26,1

Tabela 34 – Comparação com outros estudos

	AC Power (kW)	DC Power (kW)	η_{CE} (%)
PUC-Rio	2,5	3,2	76,4
Cherry Point Naval air Base	2,0	2,7	73,3
CERL	2,4	3,3	72,7

Tabela 35 – Comparação com outros estudos

	$E_{H_2, gen}$ (kW)	Recuperação de Calor (kW)	Vazão de água (m ³ /s)	Variação de temperatura (%)	η_{cog} (%)
PUC-Rio	9	5,5	0,00046	2,9	45,5
Cherry Point Naval air Base	16,7	0,9	0,00015	1,4	19,4
CERL	9,9	1,1	0,00021	1,6	38,6

Pode-se observar que a eficiência elétrica η_G variou em função da vazão do gás e da tensão de saída AC, ficando bem próximo da eficiência $\eta_{G, SARC}$. As eficiências de conversão ficaram bem próximas, mostrando a confiabilidade dos dados. A recuperação de calor foi maior na célula da PUC-Rio devido à uma maior vazão de água e a um ΔT maior.

5

Conclusões

A célula de combustível de 5 kW com um reformador foi instalada e testada na PUC-Rio com o objetivo de determinar experimentalmente seu desempenho e seu potencial de cogeração para melhorar o uso da energia química do combustível. A unidade utiliza um processador de combustível para converter energia do gás natural em hidrogênio. Isto também garante que o fornecimento de combustível para a célula tenha uma baixa concentração de CO. O processador de combustível contém três zonas de reação catalítica de separação, (1) oxidação parcial catalítica (CPO), onde os hidrocarbonos são convertidos em hidrogênios e CO, (2) conversão à alta temperatura (HST) primordial para a redução de CO e (3) conversão à baixa temperatura (LTS), para uma maior redução de CO. Na unidade de oxidação preferencial (PROX), existe uma maior redução de CO. Finalmente, a unidade PEM é o coração da célula, onde a energia elétrica é gerada. A célula é totalmente instrumentada, fornecendo informações para o cálculo da eficiência global (eficiência elétrica), eficiência de reforma, eficiência da pilha, eficiência de conversão (DC/AC) e o potencial de cogeração para uma configuração de 2,5 kW. As equações necessárias para o cálculo dos parâmetros analisados foram detalhadas anteriormente, teoricamente, dos pontos de vista termodinâmicos e eletroquímicos, e experimentalmente, do balanço de massa e energia, comparando os resultados. A eficiência teórica máxima de 82,3% é encontrada junto com o potencial de reversibilidade padrão de 1,219 V para a célula à 25°C e 1 atm. A hipótese de gás ideal é feita para calcular a tensão reversível máxima teórica de 1,219 V, quando for usado ar como fornecedor de oxigênio e comparado com o medido. As informações num regime permanente foram tiradas ao longo do estudo, resultando em eficiências médias de reforma, pilha, conversão e global, respectivamente de 50,9%, 32,4%, 76,4% e 22%. O potencial de cogeração foi estimado pelo cálculo do calor rejeitado pela pilha e o calor rejeitado pelo reformador, dando um potencial de 71,3%.

A análise dos resultados permite tirarmos mais conclusões a respeito do desempenho da célula de combustível com reformador da Plug Power:

- A irreversibilidade associada ao processo de reforma do gás natural corresponde a quase metade da energia elétrica de saída da pilha – 48,9% - afetando decisivamente o desempenho de todo o sistema.
- O balanço de massa das reações é um instrumento poderoso para a análise termodinâmica do sistema e associado a algumas medições de

composições, tais como dos gases de exaustão da chaminé da pilha e do gás natural de entrada, permitirá verificar a exatidão dos resultados disponibilizados pelo sistema de controle da pilha – SARC.

- Células de combustível tipo PEM, no estado da arte atual, ainda apresentam limitações importantes para que se tornem uma solução competitiva para aplicações de geração distribuída.
- Células que funcionam a altas temperaturas, como as de óxido sólido e carbonato fundido, superam diversas dessas limitações, tais como:
 - reforma do gás natural realizada de forma conjunta à alimentação do anodo, sem que seja necessário eliminar CO;
 - a utilização de materiais catalíticos nobres e caros nos anodos não é necessária.
- Isso pode compensar a maior irreversibilidade da reação eletroquímica da célula, devido às altas temperaturas em que operam, que, por outro lado, também permitem um melhor aproveitamento dos gases exaustos em sistema de co-geração.
- Uma análise termodinâmica mais aprofundada desses caminhos tecnológicos alternativos para células seria oportuna e indispensável no sentido de orientar quais soluções para o desenvolvimento de células a combustível são as mais promissoras.

Ao longo dos testes, a célula mostrou uma variabilidade significativa dos resultados. Essa variabilidade resultou de oscilações de tempo curto em função do algoritmo de controle interno da célula, degradação com o uso, mudança da pilha, mau funcionamento e reparos subseqüentes.

Com isso, pode-se concluir que a célula ainda não é confiável, pois possui uma baixa eficiência e uma curta durabilidade. Poderia-se reduzir seu tamanho alimentando-a diretamente com hidrogênio, retirando-se seu reformador. Uma outra conclusão importante é que a célula perde 2 kW na conversão do gás natural em hidrogênio, prejudicando-a economicamente. Outro fato que seria benéfico para a célula seria a utilização de baterias como backup (centro de manutenção da célula).

Embora a célula seja de 5 kW, não foi possível alcançar essa potência. A vida útil ainda não é muito grande, caracterizando o equipamento em estágio de desenvolvimento. Foi feita uma comparação com outros estudos, verificando-se uma boa confiabilidade dos resultados.

Com base nas incertezas é aconselhável fazer um estudo baseado no cálculo da vazão de hidrogênio e na média dos valores diários dos PCI's. Com relação à cogeração, seria ideal fazer uma variação constante da vazão.

6

Referências bibliográficas

- [1] A.J. Appleby, F.R. Foulkes, *Fuel Cell Handbook*, Van Nostrand Reinhold, New York, NY, 1989.
- [2] Angelle, J.R., and Simon, W.E., 2002, Fuel Cell Power Generation for Residential and Commercial Applications with Waste Heat Recovery. Mechanical Engineering Department, University of Louisiana at Lafayette. Proceedings of the 2002 ASEE Gulf-Southwest Annual Conference, The University of Louisiana at Lafayette, March 20 – 22.
- [3] Boettner, D., Massie, C., and Massie, D., 2004, “Lessons Learned from Residential Experience with The authors are grateful to Gerald Caesar of the Advanced Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems for Combined Heat and Power,” Proceedings of the ASME Fuel Cell Science, Engineering, and Technology Conference, pp 267-272.
- [4] CEG, Companhia Estadual de Gás, dados do gás natural do dia 12/04/2003.
- [5] Davis, Mark, “Parameters Affecting the Performance of a Residential-Scale Stationary Fuel Cell System”, NISTIR 6848, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (2002).
- [6] Do Val, L. G., Orlando, A. F., Siqueira, C.E.R., Oexmann, J., “Analysis of the co-generation potential of a 5 kW PEMFC from experimentally determined performance data”, Second International Conference on Fuel Cell Science Engineering and Technology, ASME, USA, 2004.
- [7] DoDFuelCell, ERDC/CERL Programs, Department of Defense, 2003. Available from INTERNET via <http://www.dodfuelcell.com/proton.html>.
- [8] Ellis, M. W. and Gunes, M. B., 2002, “Status of Fuel Cell Systems for Combined Heat and Power Applications in Buildings,” ASHRAE Transactions 108 Part 1.
- [9] Energy Nexus Group, 2002, Technology Characterization: Fuel Cells. Prepared for: Environmental Protection Agency, Climate Protection Partnership, Washington, DC.
- [10] FEMP, Technology Installation Review, Internet: www.eere.energy.gov/femp.
- [11] "Fuel Cell Handbook," J. Appleby and F. Foulkes, Texas A&M University, Van Nostrand Reinhold, New York (out of print), republished by Krieger Publishing Co., Melbourne, FL, 1989.
- [12] Fuel Cell Handbook. EG&G Technical Services, Inc, U.S. Department of Energy.
- [13] 2003 Fuel Cell Seminar. Special Session on Fuel Cell Power Conditioning and International Future Energy Challenge.
- [14] Gigliucci, G., et al, 2004, “Demonstration of a Residential CHP System Based on PEM Fuel Cells,” *Journal of Power Sources*, 131, pp 62-68.
- [15] Hirschenhofer, J.H., Stauffer, D.B., Engleman, R.R., and Klett, M.G., 1998, Fuel Cell Handbook, Fourth Edition, Department of Energy - Fossil Energy Technology Center, The California Hydrogen Business Council.

- [16] Hogens G., 2003, Fuel Cell Technology Handbook, CRC Press.
- [17] Holcomb, F., Davenport, B., Josefik, N., and Binder, M., 2004, "Results of a Residential Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell Demonstration at a Military Facility in New York," ASHRAE Transactions, 110, Part 1
- [18] Khartchenko N.V., 1998, Advanced Energy Systems, Institute of Energy Engineering Technical University Berlin, Taylor & Francis.
- [19] Oexmann, J., 2003, Analysis of a 5 kW PEM Fuel Cell at the Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Project Work, Dept. of Mechanical Engineering, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil.
- [20] ONSITE SYCOM Energy Corporation, 2000, The Market and Technical Potential for Combined Heat and Power in the Commercial/Institutional Sector. Prepared for: U.S. Department of Energy Information Administration, Washinton, DC, Revision 1.
- [21] Orlando, A.F., Siqueira, C.E.R., and Do Val, L.G., 2003, Performance Analysis of a 5 kW PEM Type Fuel Cell with a Natural Gas Reformer, Proceedings of 17 th International Congress of Mechanical Engineering, November 10-14, São Paulo, SP, Brazil, Paper 1169.
- [22] Plug Power, Technical Reference Manual, 2001.
- [23] Pulgar, R.G., Matelli, J.A., and Oliveira Jr A.A.M., 2002, Influence of Natural Gas Reforming Processes on the Performance of a Fuel Cell, Proceedings of IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, Paper CIT02-0666.
- [24] Resource Dynamics Corporation, 1999, Industrial Applications for Micropower: A Market Assessment. Prepared for: Office of Industrial Technologies U.S. Department of Energy, Washinton, DC and Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.
- [25] Tecnologias de Micro-Geração e Sistemas Periféricos, 2 – Pilhas de combustível, seminarios.ist.utl.pt/04-05/des/material/tfarias_mob.pdf
- [26] U.S. Department of Defense, 2005, U.S. DOD fuel cell demonstration program home page, cited Feb 18, 2005, available at <http://www.dodfuelcell.com>.
- [27] U.S. Department of Defense, 2005, U.S. DOD fuel cell demonstration program home page, cited Feb 18, 2005, available at http://www.dodfuelcell.com/res/site_performance.php4.
- [28] Van Wylen, G.J., Sonntag, R.E., and Borgnakke C., 1995, Fundamentos da Termodinâmica Clássica, Tradução da 4a edição americana, Edgard Blucher
- [29] Virginia Tech Blacksburg, Department of Chemistry, 2002, VA, 26041-0212. Available from linternet via <http://learn.chem.vt.edu/tutorials/electrochem/nernst.html>.
- [30] Winkler, W., Thermodynamics, in High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications, S.C. Singhal and K. Kendall, Editors. 2003, Elsevier Ltd.: Oxford, UK. p. 53 - 82.
- [31] www.enerview.com.

Anexo I
Composição do gás da CEG

Tabela 36 - Composição do gás natural da CEG de dezembro de 2005



DIRETORIA TÉCNICA
GERÊNCIA DE TECNOLOGIA E QUALIDADE
SERVIÇO DE TECNOLOGIA DO GÁS



DIRETORIA TÉCNICA
GERÊNCIA DE TECNOLOGIA E QUALIDADE
SERVIÇO DE TECNOLOGIA DO GÁS

RAMAL METROPOLITANO															
	1-dez	2-dez	3-dez	4-dez	5-dez	6-dez	7-dez	8-dez	9-dez	10-dez	11-dez	12-dez	13-dez	14-dez	15-dez
+C ₆	0,0038	0,0033	0,0044	0,0025	0,0017	0,0012	0,0018	0,0015	0,0020	0,0024	0,0045	0,0047	0,0035	0,0031	0,0030
C ₃ H ₈	0,4979	0,3927	0,5280	0,4936	0,4667	0,3704	0,3826	0,3798	0,4987	0,4202	0,7460	1,0568	0,7093	0,6317	0,6091
IC ₄	0,0190	0,0180	0,0176	0,0105	0,0124	0,0095	0,0091	0,0081	0,0103	0,0111	0,0104	0,0055	0,0094	0,0089	0,0132
NC ₄	0,0369	0,0348	0,0349	0,0201	0,0210	0,0170	0,0162	0,0143	0,0188	0,0205	0,0202	0,0105	0,0172	0,0164	0,0221
IC ₅	0,0062	0,0058	0,0061	0,0032	0,0028	0,0025	0,0023	0,0019	0,0027	0,0032	0,0035	0,0018	0,0026	0,0024	0,0028
NC ₅	0,0069	0,0064	0,0069	0,0036	0,0029	0,0026	0,0024	0,0020	0,0029	0,0035	0,0039	0,0021	0,0027	0,0026	0,0029
N ₂	0,7925	0,7899	0,7767	0,7643	0,7636	0,7685	0,7743	0,7723	0,7447	0,7370	0,7250	0,7251	0,7349	0,7249	0,7336
CH ₄	95,4535	95,8435	95,1611	95,2217	95,4050	96,0687	95,9144	95,8521	95,0492	95,6682	93,9262	92,6213	94,2964	94,4799	94,4031
CO ₂	0,2923	0,2838	0,2892	0,2901	0,2947	0,2908	0,2989	0,3045	0,2831	0,2762	0,3063	0,3168	0,2838	0,2987	0,2890
C ₂ H ₆	2,8910	2,6218	3,1751	3,1904	3,0294	2,4689	2,5979	2,6635	3,3876	2,8576	4,2542	5,2555	3,9401	3,8313	3,9212
PCS	9044,2764	9012,2109	9068,5391	9059,3154	9044,5293	8992,3633	9001,3027	9004,0967	9074,7549	9031,0391	9167,2012	9271,0195	9140,6465	9122,1065	9127,3340
PCI	8155,7192	8125,7544	8178,3203	8169,6807	8155,8877	8107,1797	8115,5737	8118,1939	8184,0210	8143,1626	8270,3350	8367,2998	8245,5117	8228,2178	8233,0947
DENS	0,5810	0,5785	0,5825	0,5817	0,5807	0,5769	0,5778	0,5780	0,5826	0,5792	0,5895	0,5972	0,5873	0,5860	0,5864
Massa	0,6998	0,6968	0,7016	0,7007	0,6995	0,6949	0,6959	0,6962	0,7017	0,6976	0,7100	0,7193	0,7073	0,7059	0,7062
Z	0,9979	0,9979	0,9979	0,9978	0,9979	0,9979	0,9979	0,9979	0,9978	0,9979	0,9978	0,9977	0,9978	0,9978	0,9978
I.W	11865,5322	11849,0391	11881,5273	11877,5830	11868,4463	11839,0039	11842,1094	11842,9902	11889,6406	11866,7412	11940,1191	11996,8320	11927,6963	11915,9795	11919,5732

PCS (Kcal/m³) a 20° C e 1 atm.
PCI (Kcal/m³) a 20° C e 1 atm.
Z a 20° C e 1 atm.
I.W. (Kcal/m³) a 20° C e 1 atm.
Massa Especifica (Kg/m³).
Densidade (Admensional)

PCS (Kcal/m³) a 20° C e 1 atm.
PCI (Kcal/m³) a 20° C e 1 atm.
Z a 20° C e 1 atm.
I.W. (Kcal/m³) a 20° C e 1 atm.
Massa Especifica (Kg/m³).
Densidade (Admensional)

Tabela 37 - Composição do gás natural da CEG de janeiro de 2006



DIRETORIA TÉCNICA
GERÊNCIA DE TECNOLOGIA E QUALIDADE
SERVIÇO DE TECNOLOGIA DO GÁS



DIRETORIA TÉCNICA
GERÊNCIA DE TECNOLOGIA E QUALIDADE
SERVIÇO DE TECNOLOGIA DO GÁS

RAMAL METROPOLITANO															
	1-jan	2-jan	3-jan	4-jan	5-jan	6-jan	7-jan	8-jan	9-jan	10-jan	11-jan	12-jan	13-jan	14-jan	15-jan
+C ₆	0,0024	0,0028	0,0029	0,0047	0,0047	0,0038	0,0030	0,0019	0,0017	0,0023	0,0026	0,0026	0,0031	0,0031	0,0029
C ₃ H ₈	0,7316	0,7906	1,8087	0,9946	0,8438	0,7019	0,7268	0,6309	0,5894	0,6361	0,6505	0,7167	0,7742	0,6493	0,6843
IC ₄	0,0170	0,0239	0,0494	0,0266	0,0233	0,0229	0,0180	0,0125	0,0121	0,0148	0,0143	0,0145	0,0156	0,0162	0,0147
NC ₄	0,0272	0,0375	0,0701	0,0453	0,0421	0,0398	0,0291	0,0200	0,0190	0,0241	0,0234	0,0232	0,0252	0,0264	0,0235
IC ₅	0,0030	0,0042	0,0052	0,0061	0,0063	0,0054	0,0036	0,0022	0,0020	0,0028	0,0028	0,0028	0,0025	0,0031	0,0025
NC ₅	0,0031	0,0043	0,0049	0,0066	0,0069	0,0059	0,0038	0,0022	0,0020	0,0029	0,0028	0,0026	0,0030	0,0032	0,0025
N ₂	0,7357	0,7378	0,6464	0,6841	0,7372	0,7431	0,7127	0,7541	0,7566	0,7558	0,7192	0,7305	0,7116	0,7245	0,7261
CH ₄	93,4045	93,0661	87,2650	91,5921	93,3811	93,8137	93,4155	93,9836	94,2691	94,0965	94,1335	93,8671	93,6293	93,9380	93,4232
CO ₂	0,3237	0,3246	0,4212	0,3669	0,3007	0,3165	0,3270	0,3210	0,3106	0,2929	0,3041	0,3171	0,3131	0,3107	0,3171
C ₂ H ₆	4,7519	5,0081	9,7261	6,2730	4,6540	4,3470	4,7605	4,2718	4,0375	4,1719	4,1469	4,3233	4,5221	4,3256	4,8032
PCS	9197,7725	9226,7197	9690,5762	9343,7510	9214,9727	9172,1865	9200,5752	9147,7637	9126,8096	9145,8848	9148,2275	9166,5830	9190,6367	9160,3398	9195,0459
PCI	8298,9678	8326,0049	8759,0889	8435,2363	8314,9551	8275,0762	8301,5322	8252,3252	8232,7383	8250,4941	8252,6035	8269,8125	8292,2031	8263,9512	8296,3838
DENS	0,5921	0,5942	0,6286	0,6029	0,5930	0,5902	0,5921	0,5886	0,5869	0,5880	0,5880	0,5896	0,5911	0,5890	0,5917
Massa	0,7131	0,7157	0,7572	0,7261	0,7142	0,7108	0,7131	0,7089	0,7069	0,7082	0,7082	0,7102	0,7120	0,7094	0,7126
Z	0,9977	0,9977	0,9974	0,9976	0,9977	0,9978	0,9977	0,9978	0,9978	0,9978	0,9978	0,9978	0,9978	0,9978	0,9978
I.W	11953,5029	11969,2998	12221,5244	12033,6250	11966,5127	11939,3613	11956,9844	11923,7734	11913,3447	11927,0928	11930,4941	11937,5078	11953,7432	11935,7100	11954,1162

PCS (Kcal/m³) a 20° C e 1 atm.
PCI (Kcal/m³) a 20° C e 1 atm.
Z a 20° C e 1 atm.
I.W. (Kcal/m³) a 20° C e 1 atm.
Massa Especifica (Kg/m³).
Densidade (Admensional)

PCS (Kcal/m³) a 20° C e 1 atm.
PCI (Kcal/m³) a 20° C e 1 atm.
Z a 20° C e 1 atm.
I.W. (Kcal/m³) a 20° C e 1 atm.
Massa Especifica (Kg/m³).
Densidade (Admensional)

ANEXO II

Lista de Gráficos e Tabelas

Dia 15/12/2005

A fig. 21 mostra o número de moles de hidrogênio gerado pelo reformador.

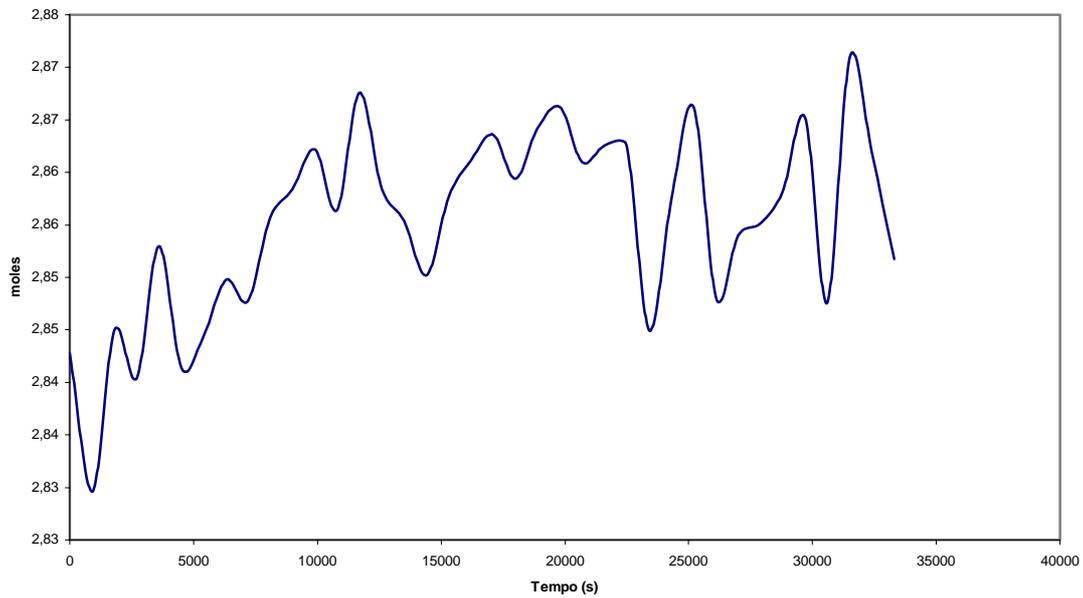


Figura 21: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (15/12/2005).

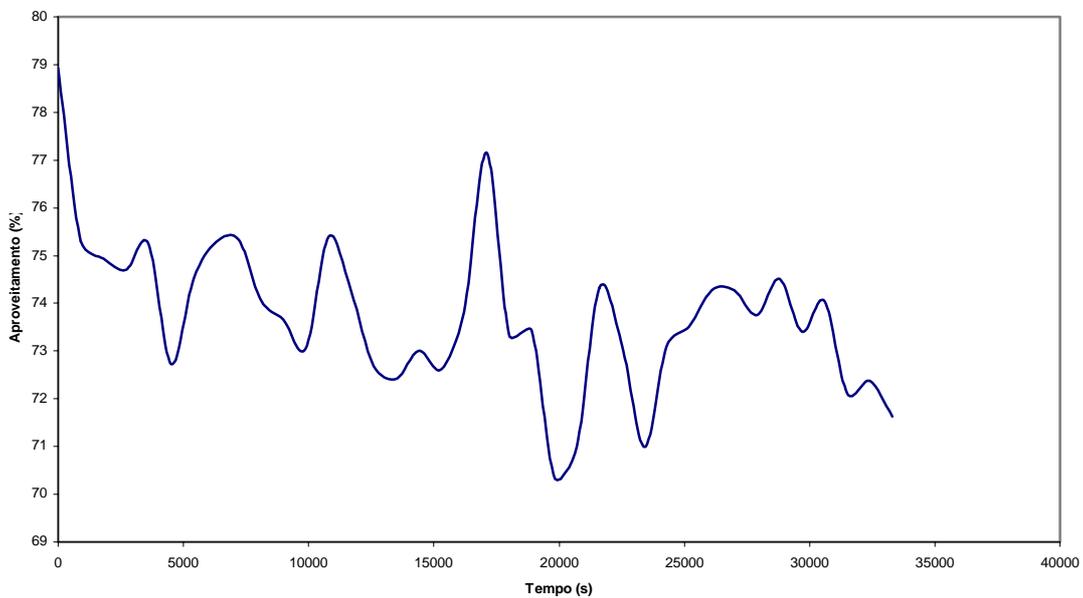


Figura 22: Aproveitamento da célula em função do tempo (15/12/2005).

Balço de massa e energia

Tabela 38 – Resultados referentes à água.

T(s)	101 C	102 C	Q (kW)	Água (kg/s)
0				
900	44	47	5,68	0,50
1800	44	47	5,58	0,49
2700	45	47	5,35	0,47
3600	45	48	5,36	0,48
4500	45	48	5,38	0,47
5400	45	48	5,35	0,46
6300	46	48	5,54	0,47
7200	46	49	5,95	0,50
8100	47	49	5,43	0,47
9000	47	50	5,52	0,47
9900	47	50	5,06	0,44
10800	48	50	5,21	0,44
11700	48	50	5,57	0,47
12600	48	51	5,24	0,44
13500	48	51	5,51	0,46
14400	48	51	5,47	0,46
15300	48	51	5,60	0,46
16200	48	51	5,60	0,46
17100	49	52	5,47	0,43
18000	49	52	5,57	0,44
18900	49	52	5,61	0,46
19800	49	52	5,55	0,44
20700	49	52	5,32	0,42
21600	49	52	5,44	0,44
22500	49	52	5,31	0,43

Tabela 39 – Resultados referentes ao óleo.

Propylene Glycol			
Entrada	Saída	Cp (kJ/kg*K)	Vazão (kg/s)
57	45	3,70	0,13
58	45	3,70	0,12
58	45	3,70	0,11
59	45	3,70	0,10
59	45	3,70	0,10
58	45	3,70	0,11
57	45	3,70	0,12
57	46	3,70	0,15
57	47	3,70	0,15
57	47	3,70	0,15
58	47	3,70	0,12
60	48	3,71	0,12
58	48	3,71	0,15
58	47	3,70	0,13
58	45	3,70	0,11
58	49	3,71	0,16
59	49	3,71	0,15
59	49	3,71	0,15
59	49	3,71	0,15
59	49	3,71	0,15
59	49	3,71	0,15
58	49	3,71	0,17
58	48	3,71	0,14
58	48	3,71	0,15
58	48	3,71	0,14

Tabela 40 – Resultados referentes ao trocador de calor.

Cf (kW/K)	Cq (kW/K)	Cr	q_{máx} (kW)	e
2,09	0,47	0,23	6,08	0,93
2,04	0,43	0,21	5,86	0,95
1,95	0,41	0,21	5,51	0,97
2,00	0,38	0,19	5,42	0,99
1,95	0,38	0,20	5,36	1,00
1,90	0,41	0,22	5,25	1,02
1,95	0,46	0,24	5,30	1,05
2,09	0,54	0,26	5,89	1,01
1,95	0,54	0,28	5,64	0,96
1,95	0,55	0,28	5,52	1,00
1,86	0,46	0,25	4,91	1,03
1,86	0,43	0,23	5,42	0,96
1,95	0,56	0,29	5,78	0,96
1,86	0,48	0,26	4,85	1,08
1,90	0,42	0,22	4,27	1,29
1,90	0,61	0,32	6,03	0,91
1,90	0,56	0,29	6,02	0,93
1,90	0,56	0,29	5,92	0,95
1,81	0,55	0,30	5,65	0,97
1,86	0,56	0,30	5,66	0,99
1,90	0,56	0,29	5,67	0,99
1,86	0,62	0,33	5,60	0,99
1,76	0,53	0,30	4,82	1,10
1,86	0,54	0,29	4,89	1,11
1,81	0,53	0,29	4,79	1,11

Pode-se observar uma efetividade média igual a 1 devido às incertezas de medições.

Dia 19/12/2005

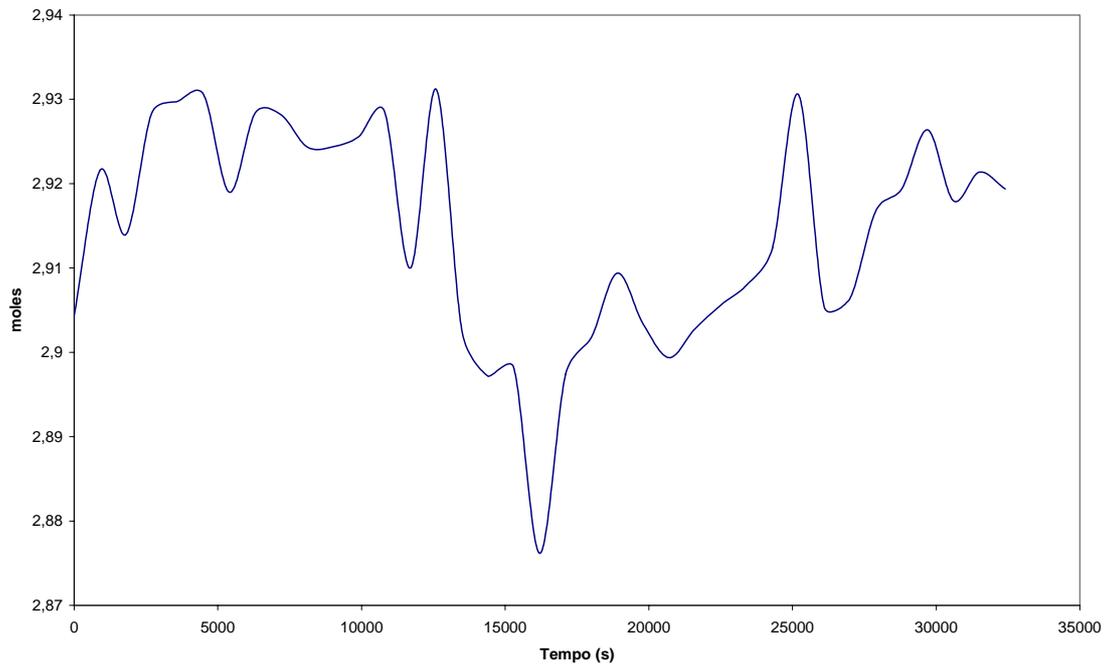


Figura 23: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (19/12/2005).

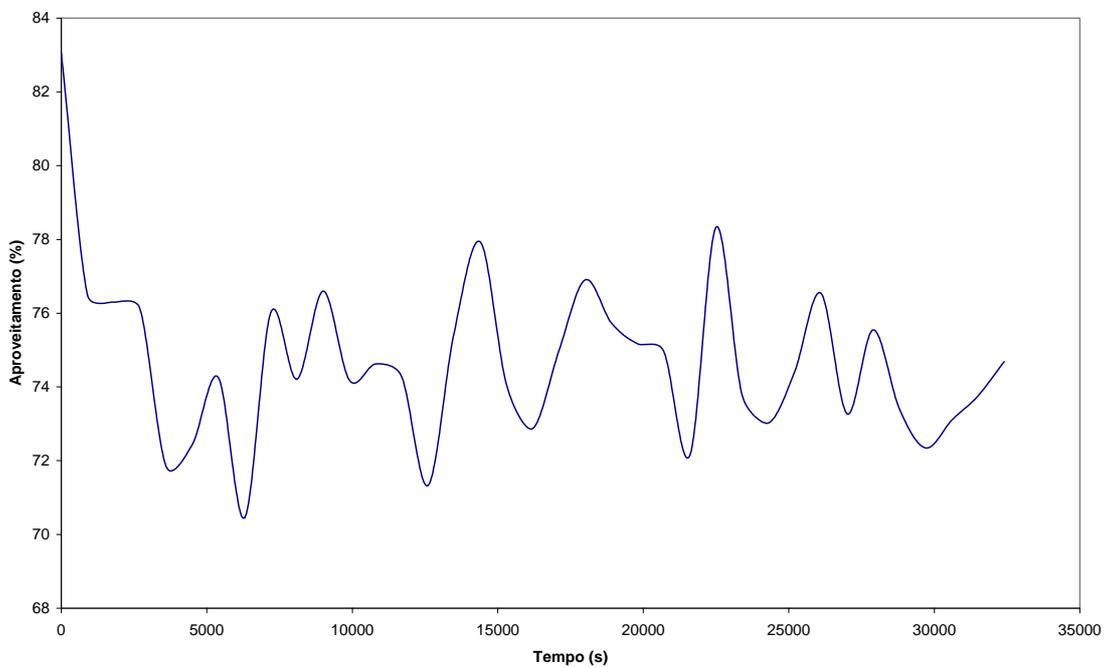


Figura 24: Aproveitamento da célula em função do tempo (19/12/2005).

Dia 20/12/2005

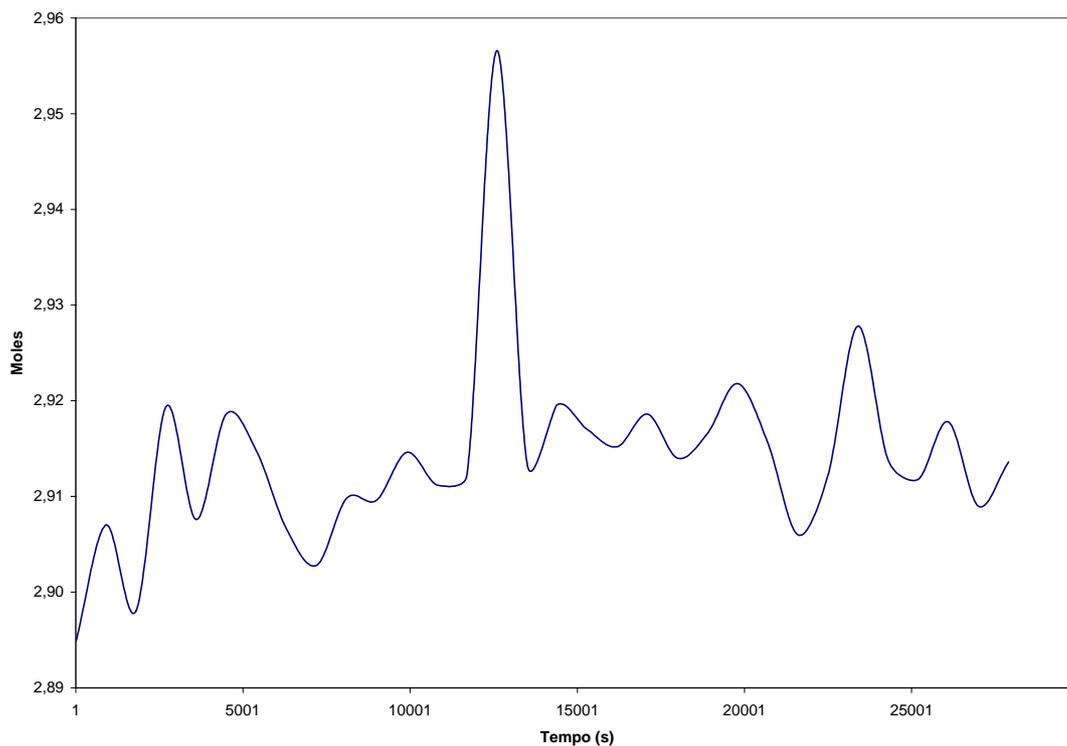


Figura 25: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (20/12/2005).

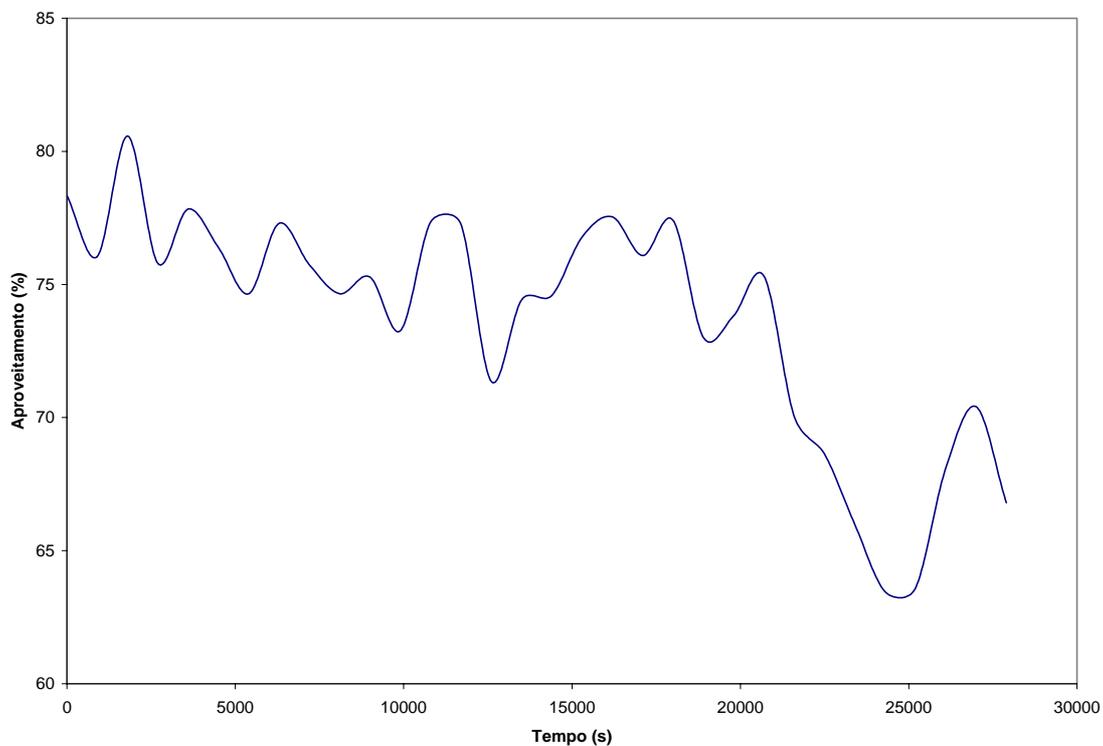


Figura 26: Aproveitamento da célula em função do tempo (20/12/2005).

Dia 22/12/2005

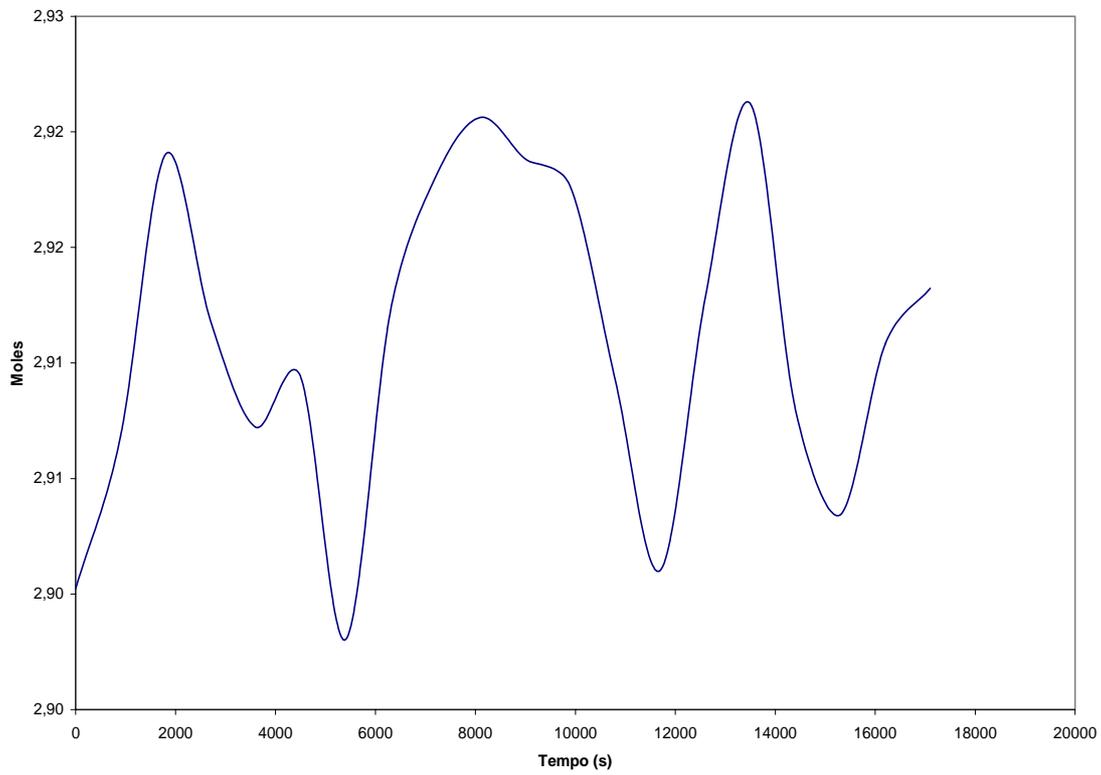


Figura 27: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (22/12/2005).

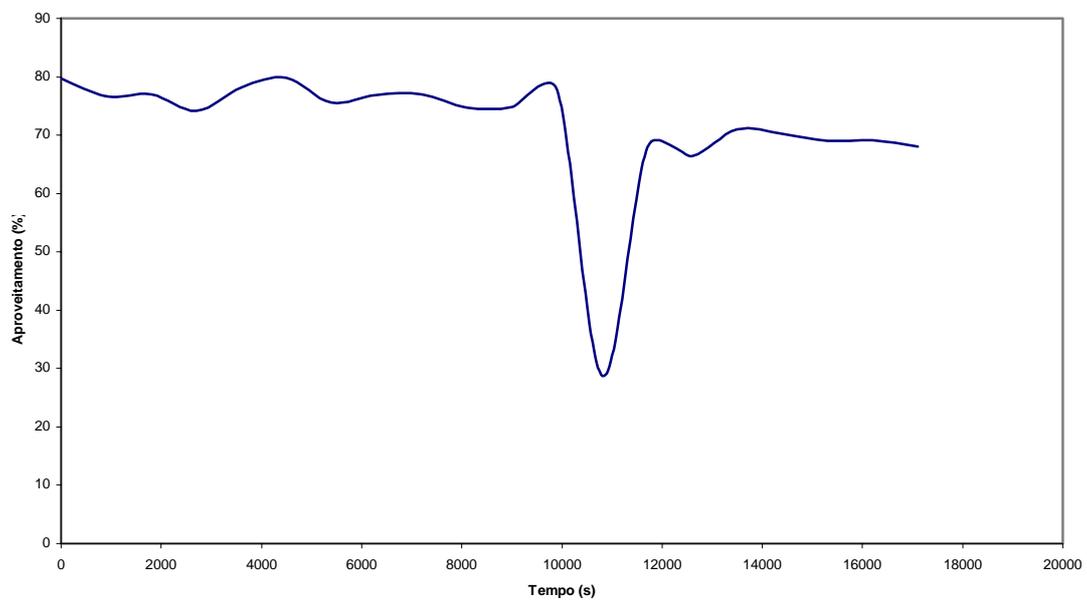


Figura 28: Aproveitamento da célula em função do tempo (22/12/2005).

Dia 26/12/2005

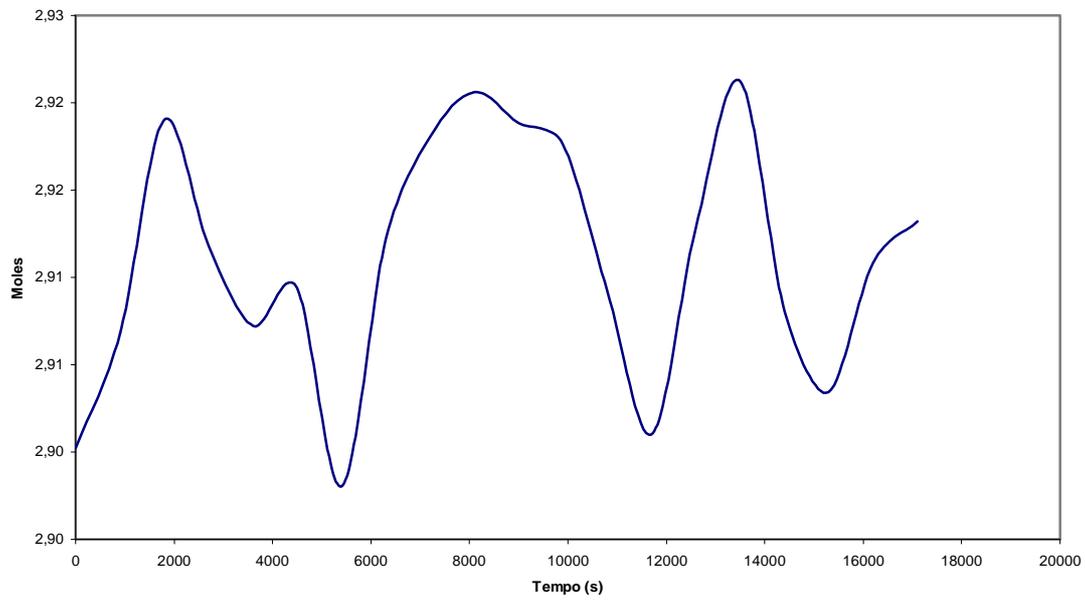


Figura 29: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (26/12/2005).

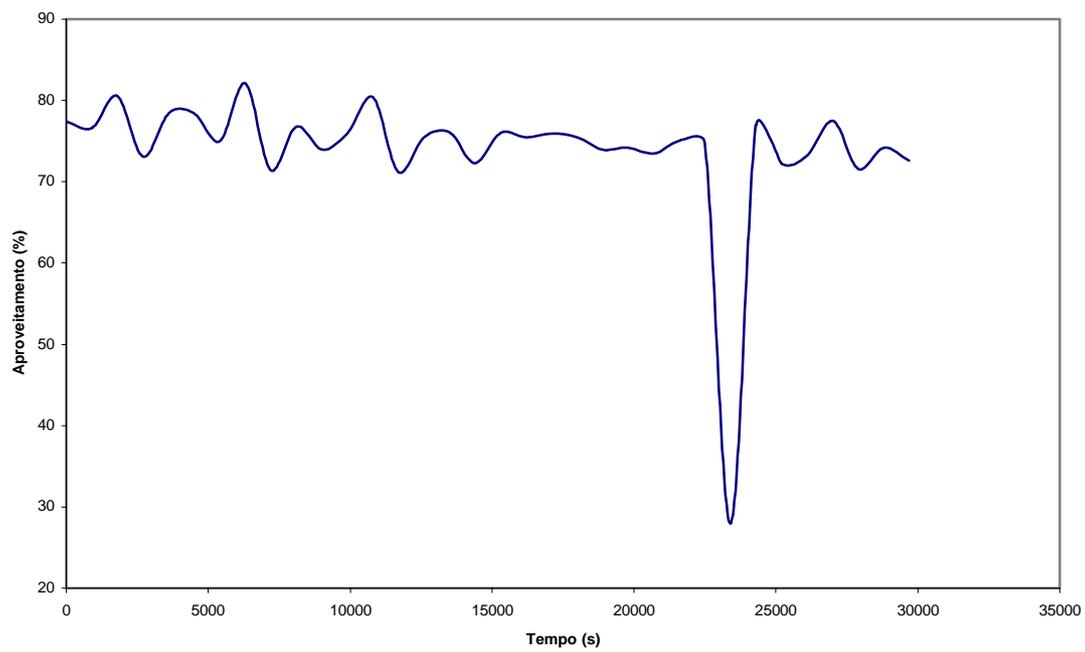


Figura 30: Aproveitamento da célula em função do tempo (26/12/2005).

Dia 27/12/2005

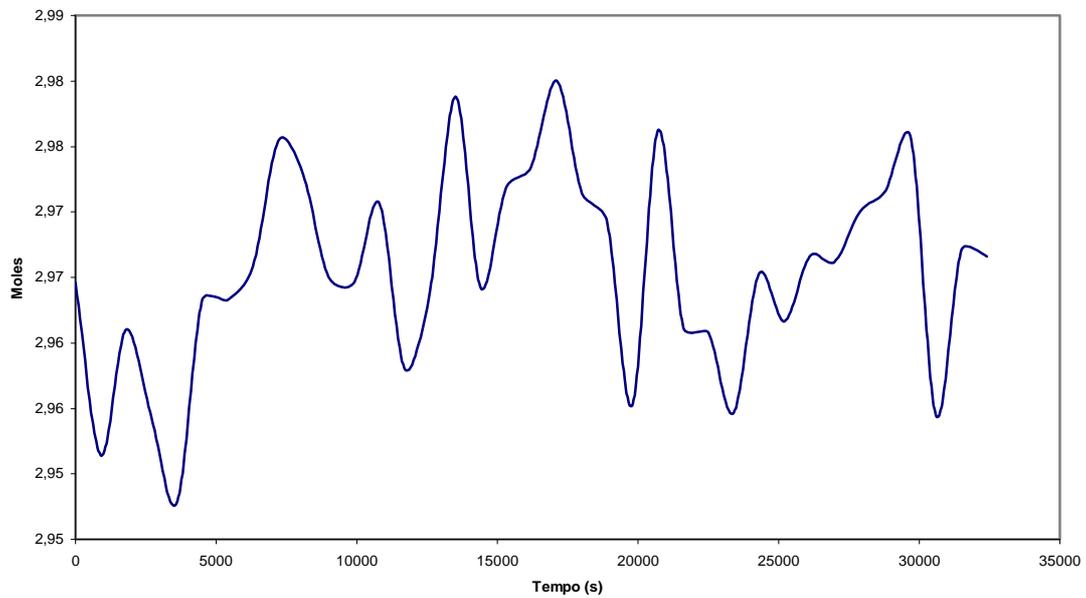


Figura 31: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (27/12/2005).

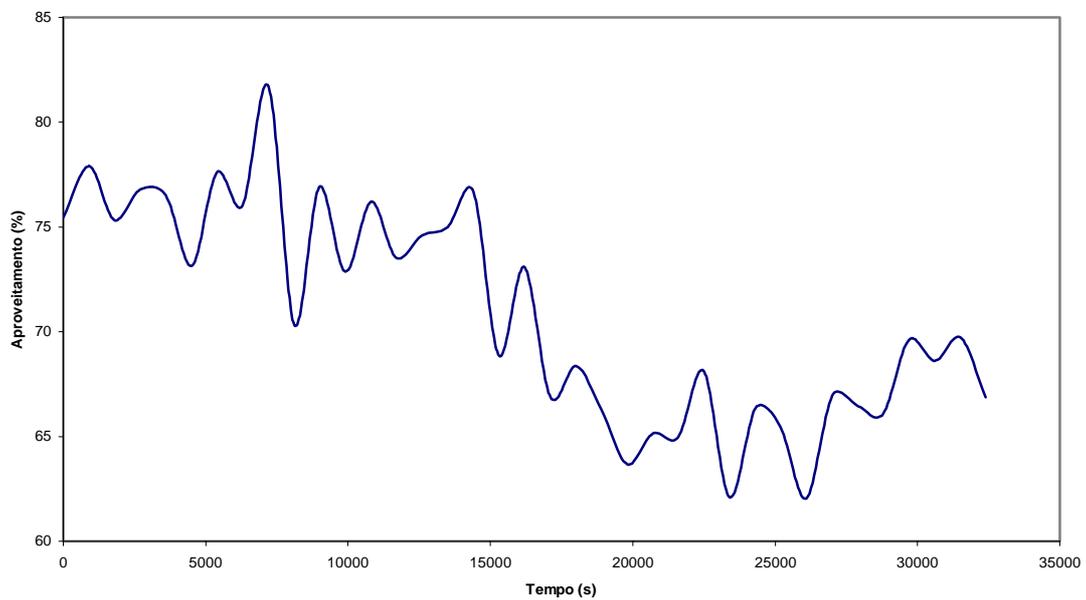


Figura 32: Aproveitamento da célula em função do tempo (27/12/2005).

Dia 28/12/2005

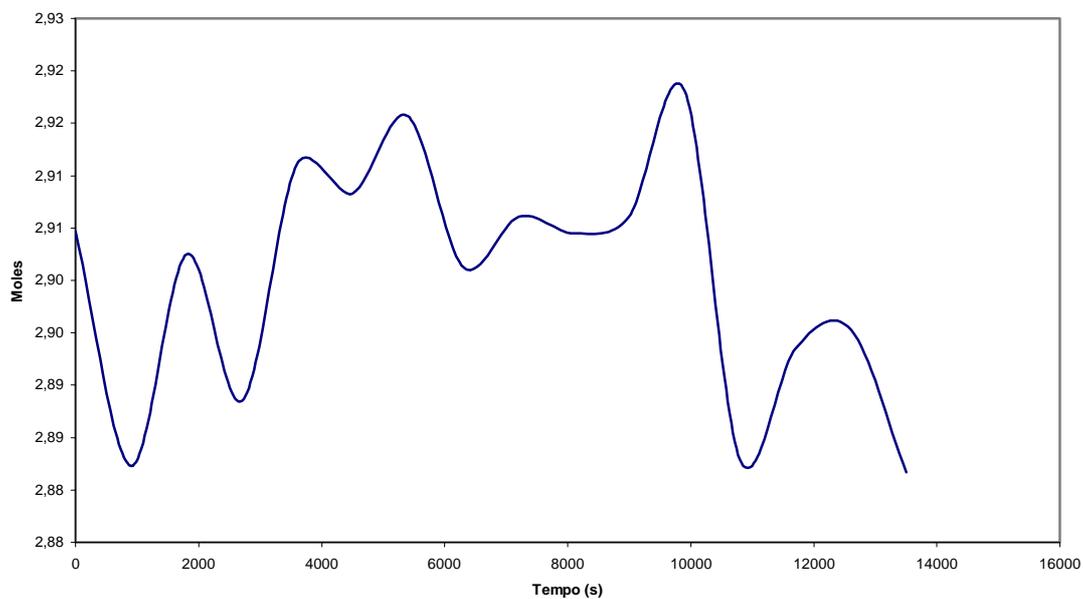


Figura 33: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (28/12/2005).

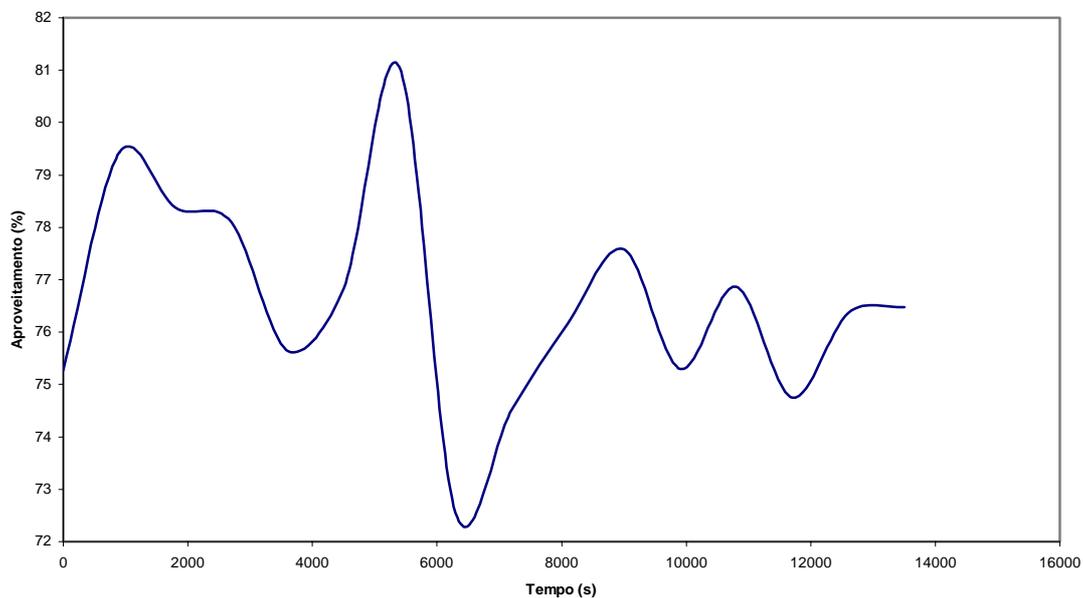


Figura 34: Aproveitamento da célula em função do tempo (28/12/2005).

Dia 29/12/2005

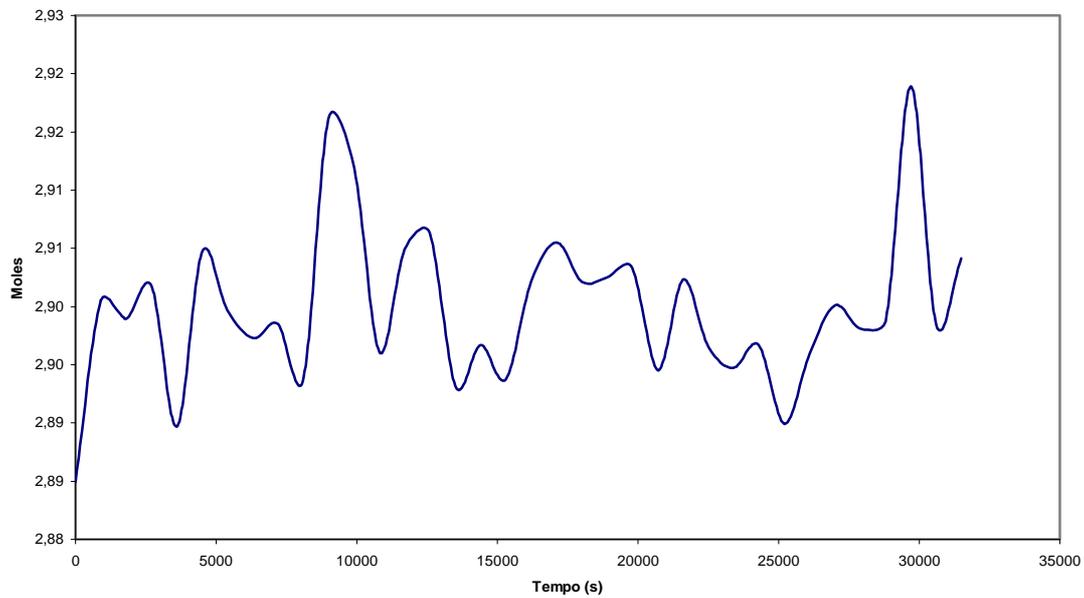


Figura 35: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (29/12/2005).

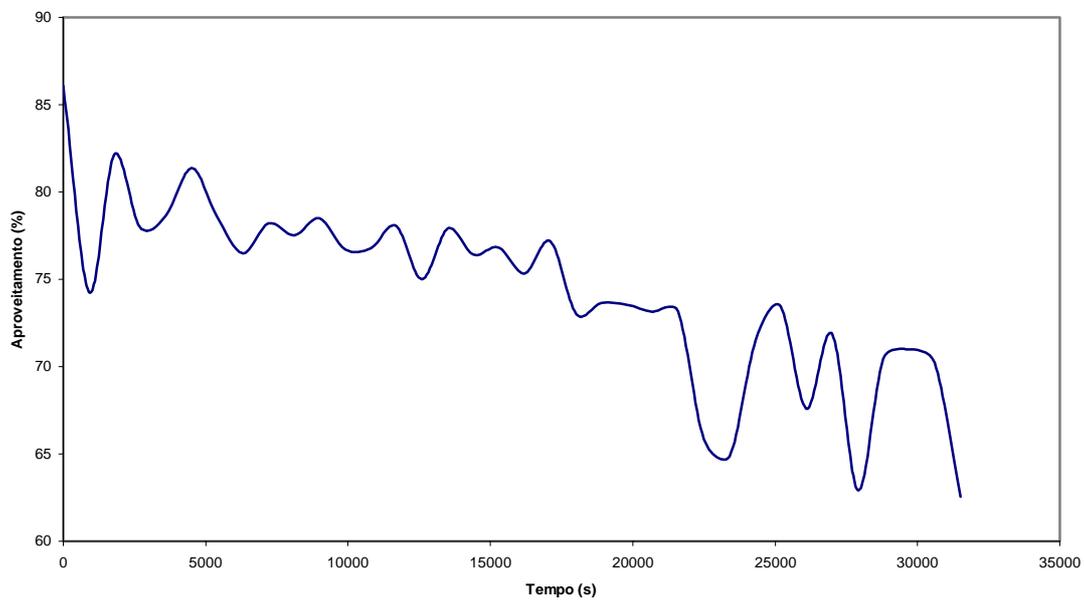


Figura 36: Aproveitamento da célula em função do tempo (29/12/2005).

Dia 02/01/2006

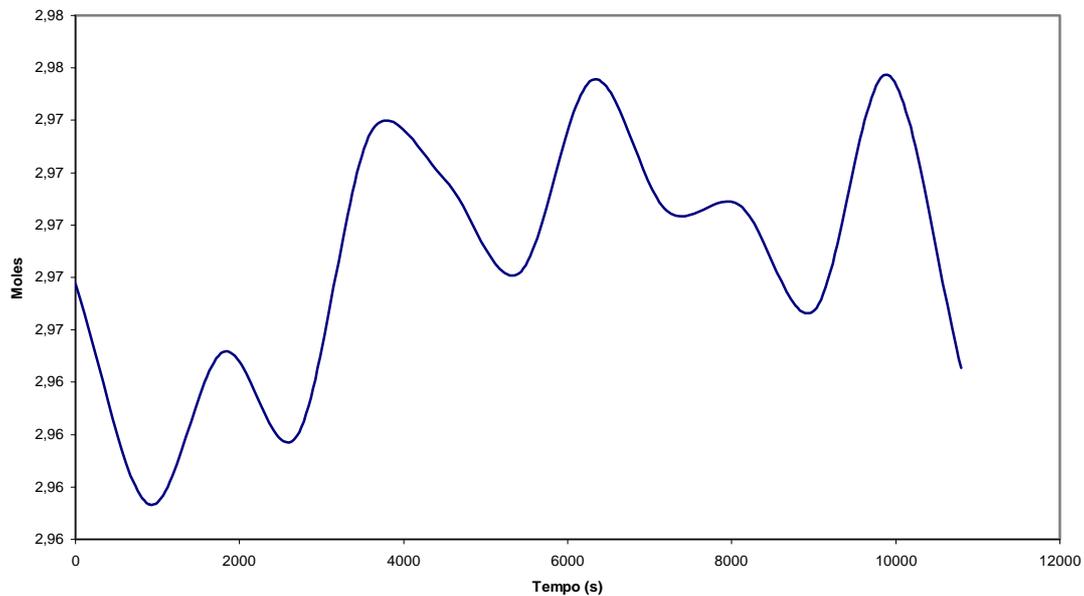


Figura 37: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (02/01/2006).

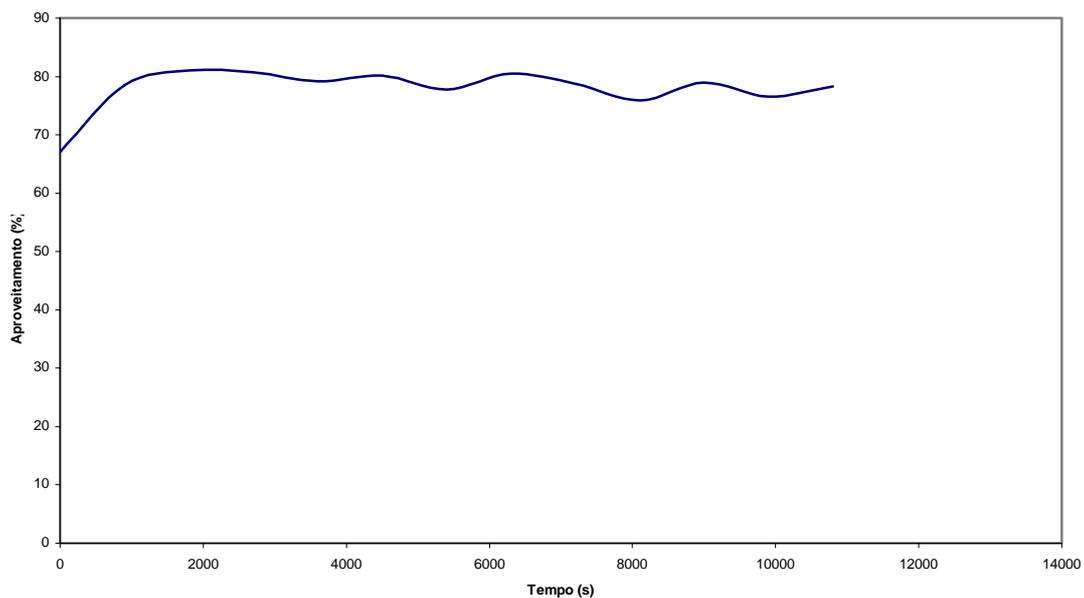


Figura 38: Aproveitamento da célula em função do tempo (02/01/2006).

Dia 03/01/2006

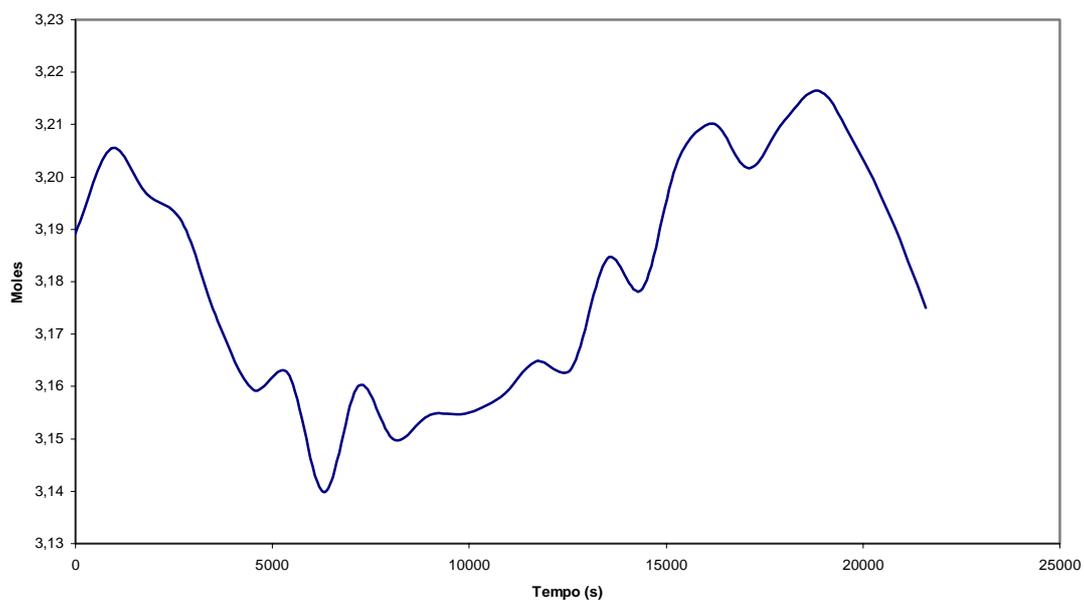


Figura 39: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (03/01/2006).

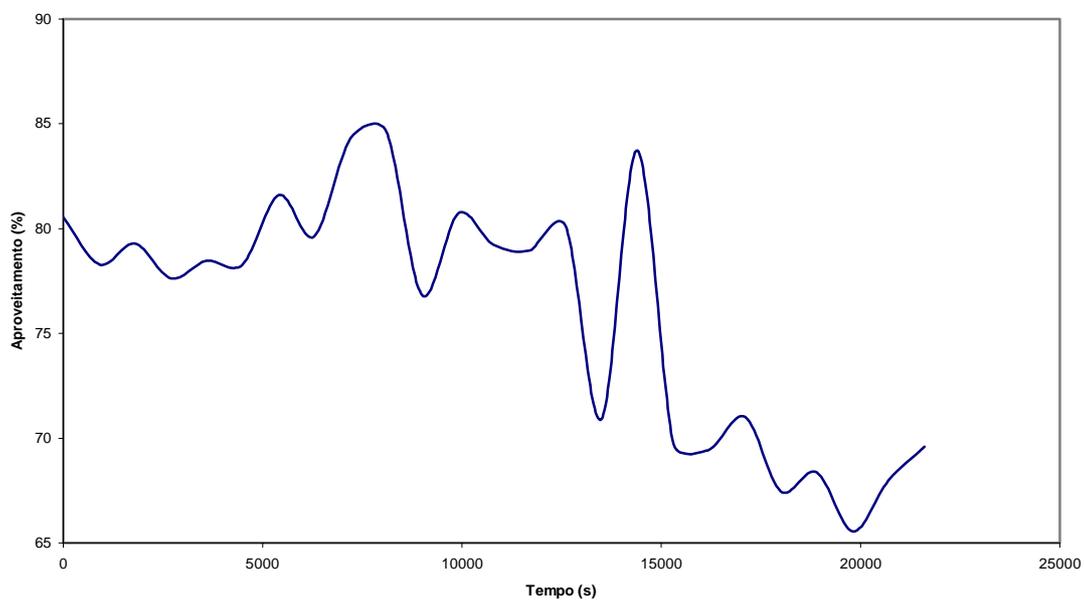


Figura 40: Aproveitamento da célula em função do tempo (03/01/2006).

Dia 04/01/2006

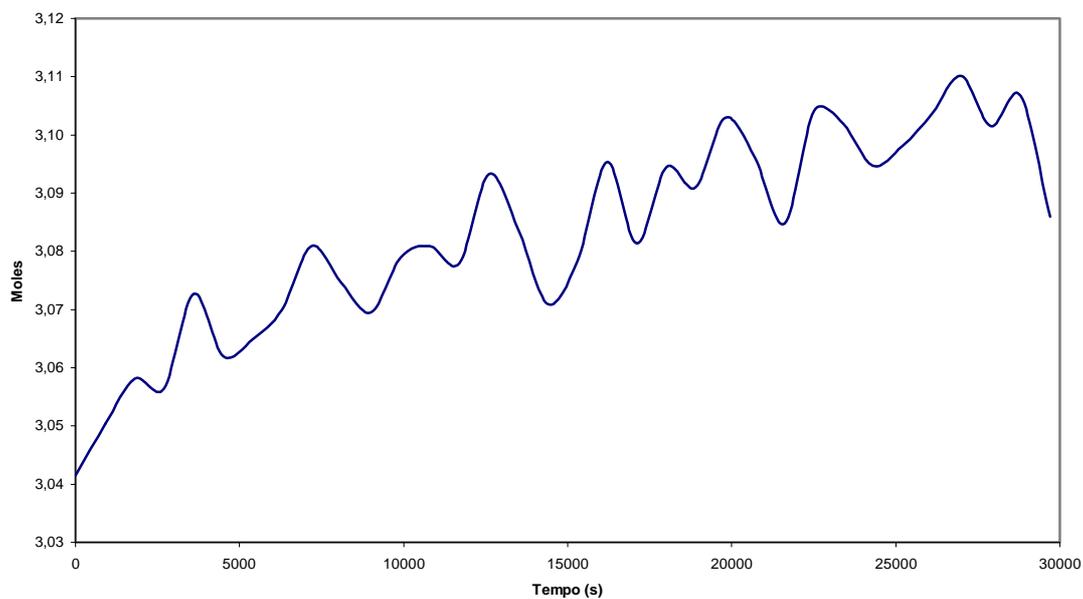


Figura 41: Número de moles de hidrogênio gerado no reformador em função do tempo (04/01/2006).

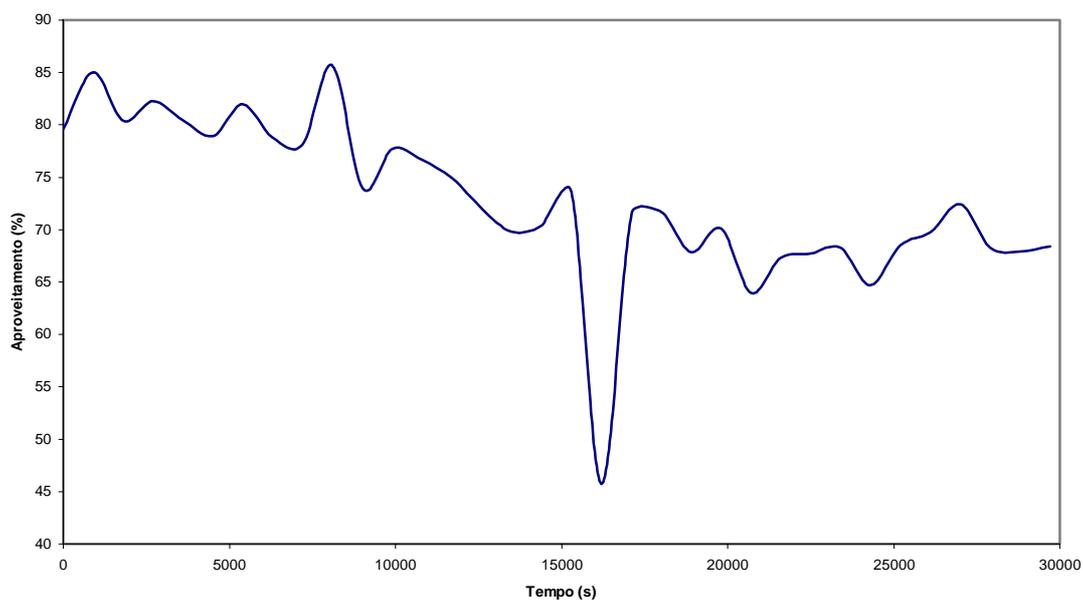


Figura 42: Aproveitamento da célula em função do tempo (04/01/2006).

Anexo III

Proteções da célula de combustível

Proteções da Célula de Combustível

UPI (interrupções na potência repentinas) são causadas por falhas no equipamento e/ou migrações de processo que causam a interrupção do sistema prejudicando a geração de eletricidade AC. Esses eventos podem interromper temporariamente a geração de eletricidade ou desligar o sistema por completo. Todos os eventos que impactam no sistema são registrados pelo programa da célula no momento que eles ocorrem.

Esses eventos resultam de cinco causas principais:

- Problemas no ATO/CPO (37%) – falhas no ATO/CPO são causados pela remoção incompleta dos componentes sulfurosos do gás natural, o que causa conseqüentemente uma saída de metano do ATO. A reação catalisadora no ATO fica inconstante e resulta em uma incontrolável mudança de temperatura que desliga o sistema por completo.
- Problemas na pilha (23%) – eventos na pilha são atribuídos à uma grande variedade de causas como falhas no cartão de scanner (baixa tensão na célula), bombas e falhas nos termopares, baixo nível de resfriamento na pilha e pouca circulação de água DI. Problemas na pilha desligam a célula por completo.
- Problemas nos inversores (16%) – algumas interrupções dos inversores não são bem entendidas e se acredita que são causadas por uma interrupção de comunicações do programa. Flutuações na tensão da rede também desligarão a célula conforme projetadas. Quando o inversor espontaneamente desligar, a corrente DC é mantida, mas a geração da corrente AC é interrompida por 10 a 30 minutos.
- Problemas na bateria (10%) – quatro baterias dão suporte ao sistema de operação. Muitas das falhas da bateria ocorrem quando a tensão cai abaixo de 46 V, um evento que ocorre muito freqüentemente durante a partida da célula. Em ocasiões diversas, as falhas da bateria resultam de um aquecimento. Alertas da bateria desligam o sistema por completo.
- Problemas no umidificador (10%) – eventos no umidificador são causados principalmente por falhas no Sensor de Nível #5. Eventos nos umidificadores também são causados por uma falta de água DI. Falha no sensor pode levar a uma umidificação excessiva, a uma inundação

da pilha da célula ou uma grande quantidade de vapor para taxa de carbono.

UPI podem ser distinguidas de quando o sistema está inicializando ou quando elas ocorrem após o sistema ter alcançado o regime permanente da operação. Durante a inicialização do sistema, a unidade passa por testes de autodiagnósticos. Por todas as partes do processo, o sistema checa numerosos parâmetros para garantir segurança e funcionalidade. Como resultado, o sistema é mais propenso para ambos, tendo e reconhecendo cada evento durante a operação do sistema (o grande número de eventos de interrupções durante a inicialização é uma consequência do grande número de partidas realizadas pelo sistema. Com uma melhora do desempenho durante o regime permanente da operação, isso manterá o sistema ativo por mais tempo e evitará um grande número de problemas com partida). De todos os UPI, aproximadamente dois terços ocorrem após três horas de funcionamento causando uma reinicialização do sistema, enquanto que um terço ocorre durante as operações de regime permanente.

A UPI durante as operações de regime permanente

A UPI's que ocorrem durante as operações de regime permanente são mais críticas para as células residenciais, pois os consumidores dependem de eletricidade sendo muito sensíveis às interrupções em regime permanente. Mesmo sendo um problema importante, interrupções durante a partida são menos críticas pelo fato do sistema operar em menos tempo. Além disso, o número de partidas do sistema será reduzido quando poucos desligamentos ocorrerem durante operações normais.

Esses UPI's ocorreram em função de problemas em quatro subcomponentes:

- Problemas na pilha (57%)
- Problemas no inversor (29%)
- Problemas na bateria (9%)
- Problemas no umidificador (6%)

O sistema SU-1 obtido pela Center é uma Unidade de Demonstração Tecnológica (TDU), a qual de acordo com a Plug Power é observada uma frequência de reparos. Com isso, pode ser vivenciado um período de baixo funcionamento o qual podem ser necessários a troca de componentes críticos e seu desempenho pode degradar a potência elétrica, a eficiência e as quantidade de emissões estipuladas para a unidade. Plug Power tem resolvido um grande número de questões técnicas

presentes nessas máquinas as quais diminuirão o número de UPI presente em máquinas atuais e futuras.

Desde que a Center obteve o sistema SU-1 em Maio de 2002, a Plug Power melhorou a tecnologia SU-1 que será utilizada na próxima geração Gensys. Como mostrado abaixo, os problemas foram reduzidos em dois. Em particular, a Plug Power tomou as seguintes medidas que irão impactar diretamente nos UPI identificados pelos testes.

Foram identificadas as causas dos problemas com temperaturas no ATO/CPO como uma questão de retirada de enxofre. Com relação à melhora da retirada de enxofre do equipamento combinada com uma melhor precisão de identificar o problema, atuais e futuras máquinas deverão ser menos suscetíveis à interrupções desse problema.

Troca do inversor PP10 para o inversor MP5. Diferente do PP10, a unidade MP5 permite a bateria ser carregada pela rede. Isso eliminará o potencial de drenagem das baterias antes de completar a partida, um problema que resultou em 9% de interrupções operacionais. Com isso, o inversor permite a célula funcionar independentemente da rede e seguir uma carga variável.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)