

**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**

**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	Balanço 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 ( $\eta_G$ ) para 2,5 kW em novembro de 2004	81
Tabela 12 - Eficiência térmica global da célula ( $\eta_G$ ) para 2,5 kW em dezembro de 2004	82
Tabela 13 - Eficiência térmica global da célula ( $\eta_G$ ) para 2,5 kW em dezembro de 2005	82
Tabela 14 - Eficiência térmica global da célula ( $\eta_G$ ) para 2,5 kW em janeiro de 2006	83
Tabela 15 - Eficiência térmica da pilha ( $\eta_T$ ) em novembro de 2004	85
Tabela 16 - Eficiência térmica da pilha ( $\eta_T$ ) em dezembro de 2004	85
Tabela 17 - Eficiência térmica da pilha ( $\eta_T$ ) em dezembro de 2005	86
Tabela 18 - Eficiência térmica da pilha ( $\eta_T$ ) em janeiro de 2006	86
Tabela 19 - Eficiência de conversão ( $\eta_{CE}$ ) em novembro de 2004	87
Tabela 20 - Eficiência de conversão ( $\eta_{CE}$ ) em dezembro de 2004	87
Tabela 21 - Eficiência de conversão ( $\eta_{CE}$ ) em dezembro de 2005	88
Tabela 22 - Eficiência de conversão ( $\eta_{CE}$ )	88
Tabela 23 - Eficiência do Reformador ( $\eta_R$ ) em novembro de 2004	89
Tabela 24 - Eficiência do Reformador ( $\eta_R$ ) em dezembro de 2004	89
Tabela 25 - Eficiência do Reformador ( $\eta_R$ ) em dezembro de 2005	90
Tabela 26 - Eficiência do Reformador ( $\eta_R$ ) 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<sup>-</sup>).

$G_i$ , quantidade molar parcial da energia livre de Gibbs.

$h_i$ , entalpia do elemento i, kJ/kg.

$h_i^\circ$ , 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.

$s_i^\circ$ , 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

$\Delta G$ , variação da energia livre de Gibbs, kJ/mol.

$\Delta h$ , variação de entalpia, kJ/kg.

$\Delta s$ , variação de entropia, kJ/kg °C.

$\eta$ , eficiência, %.

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

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

$\eta_{CE}$ , eficiência de conversão, %.

$\eta_G$ , eficiência térmica global da célula, %.

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

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

$\eta_{TH}$ , eficiência térmica de pilha teórica, %.



$\eta_R$ , eficiência do reformador, %.

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

$\epsilon_{HX1}$ , efetividade do trocador de calor 1.

$\epsilon_{HX2}$ , efetividade do trocador de calor 2.

$\epsilon_{HX3}$ , efetividade do trocador de calor 3.

Índices

a, componente.

b, componente.

c, componente.

d, componente.

i, componente

in, entra.

out, sai.