

15728

TC

mapeta

o/y

Paper CIT02-0705

DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS PARA UM MÓDULO PEM DE 1kW ELÉTRICO

Walmir Maximo Torres

IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Centro de Engenharia Nuclear
Av. Prof. Lineu Prestes 2242 – Cidade Universitária – São Paulo – SP – Brasil – 05508-900
wmaxim@ipen.br

Eduardo Mapeilian

IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Centro de Engenharia Nuclear
Av. Prof. Lineu Prestes 2242 – Cidade Universitária – São Paulo – SP – Brasil – 05508-900
emapeil@ipen.br

Luiz Alberto Macedo

IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Centro de Engenharia Nuclear
Av. Prof. Lineu Prestes 2242 – Cidade Universitária – São Paulo – SP – Brasil – 05508-900
lamacedo@ipen.br

Benedito Dias Baptista Filho

IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Centro de Engenharia Nuclear
Av. Prof. Lineu Prestes 2242 – Cidade Universitária – São Paulo – SP – Brasil – 05508-900
bdbfilho@ipen.br

Resumo. Este trabalho descreve o projeto conceitual dos sistemas necessários para o funcionamento e para testes de desempenho de um módulo formado por um conjunto de células a combustível do tipo PEM (Proton Exchange Membrane) com potência elétrica de 1 kW. Dentre esses sistemas destacam-se: sistema de fornecimento de gases, sistema de fornecimento de água e sistema de remoção e aproveitamento de calor. São apresentados os cálculos dos consumos de gases e o cálculo do rendimento do módulo.

Palavras chave: células a combustível, sistemas, PEM.

1. Introdução

A geração de energia elétrica por meio de módulos de células a combustível tem recebido especial atenção em todo o mundo devido às suas características, principalmente em relação ao reduzido impacto ambiental, alta densidade de potência e eficiência de transformação de energia química em elétrica, possibilidade de geração distribuída de energia elétrica aliada ao aproveitamento térmico do calor gerado para aquecimento, e portabilidade para uso em transporte. Muito tem sido investido em todo o mundo para viabilizar essa tecnologia, principalmente na área automotiva, conforme pode ser visto, por exemplo, em (www.fuelcell.com) e Wendt et al (2000). O princípio de funcionamento das células combustíveis foi descrito por Sir Grove, há cerca de 150 anos. Problemas técnicos e de custo de materiais atrasaram muito qualquer possibilidade de implementação comercial durante mais de um século. Foram desenvolvidos vários tipos de células a combustível, cada um apresentando vantagens e desvantagens: AFC (Alcaline Fuel Cell), PEM (Proton Exchange Membrane), PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell), MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) e SOFC (Solid Oxide Fuel Cell).

Desde 1998, o Centro de Ciência e Tecnologia dos Materiais (CCTM) do IPEN vem desenvolvendo os processos de fabricação dos eletrodos (MEA - Membrane/Matrix Electrode Assembly) usado nas células do tipo PEM e também tem realizado pesquisas para o desenvolvimento das células que operam em alta temperatura, tipo SOFC. Para a consolidação desses desenvolvimentos está sendo proposto o projeto de um módulo composto por células a combustível do tipo PEM para geração de 1 kW elétrico utilizando-se o hidrogênio como combustível e o oxigênio ou ar como oxidante. O IPEN ainda estuda o uso de outros combustíveis como o etanol, o metanol, CH₄, NH₃, etc., que poderão ser utilizados desde que submetidos a um processo de reforma para a extração do hidrogênio. Nesse projeto, o Centro de Engenharia Nuclear (CEN) do IPEN ficou responsável pelo estudo dos sistemas auxiliares necessários para o funcionamento do módulo e para o controle do processo.

Este artigo descreve (seção 2) os sistemas necessários para o funcionamento e para testes de desempenho de um módulo formado por um conjunto de células a combustível do tipo PEM (Proton Exchange Membrane) com potência elétrica de 1 kW. Dentre esses sistemas destacam-se: sistema de fornecimento de gases, sistema de fornecimento de água e sistema de remoção e aproveitamento de calor. São apresentados os cálculos dos consumos de gases e o cálculo do rendimento do módulo. O sistema elétrico de transformação de corrente contínua para corrente alternada também será desenvolvido pelo CEN, contudo não é abordado neste artigo. O módulo e os sistemas serão montados em um laboratório onde se pretende estudar o seu comportamento, obtendo-se o rendimento e avaliando-se as características dos eletrodos que estão sendo desenvolvidos pelo CCTM. Os cálculos dos consumos de gases (hidrogênio, oxigênio e

PRODUÇÃO TÉCNICO CIENTÍFICA
DO IPEN
DEVOLVER NO BALCÃO DE
EMPRÉSTIMO

9285

ar) e da eficiência do módulo foram realizados com base nas equações fornecidas no (Fuel Cell Handbook, 2000) e são apresentadas na seção 3.

2. Descrição dos Sistemas

O módulo de células a combustível proposto consiste de um conjunto de células unitárias do tipo membrana polimérica (Proton Exchange Membrane - PEM) dispostas em série e com uma capacidade de geração elétrica de 1 kW, com tensão de 100 VAC e corrente de 10 A, após transformação de corrente contínua para alternada. O combustível será o hidrogênio puro (99,999 %) e o oxidante será o oxigênio puro (99,999 %), com alternativa de uso de ar filtrado.

Os sistemas do módulo abrangem o fornecimento de gases, incluindo o seu aquecimento e umidificação, o resfriamento das células, a retirada de água produzida nas células, a segurança em relação a vazamentos de H₂ e a exaustão de gases. A Fig. (1) apresenta o fluxograma esquemático dos sistemas.

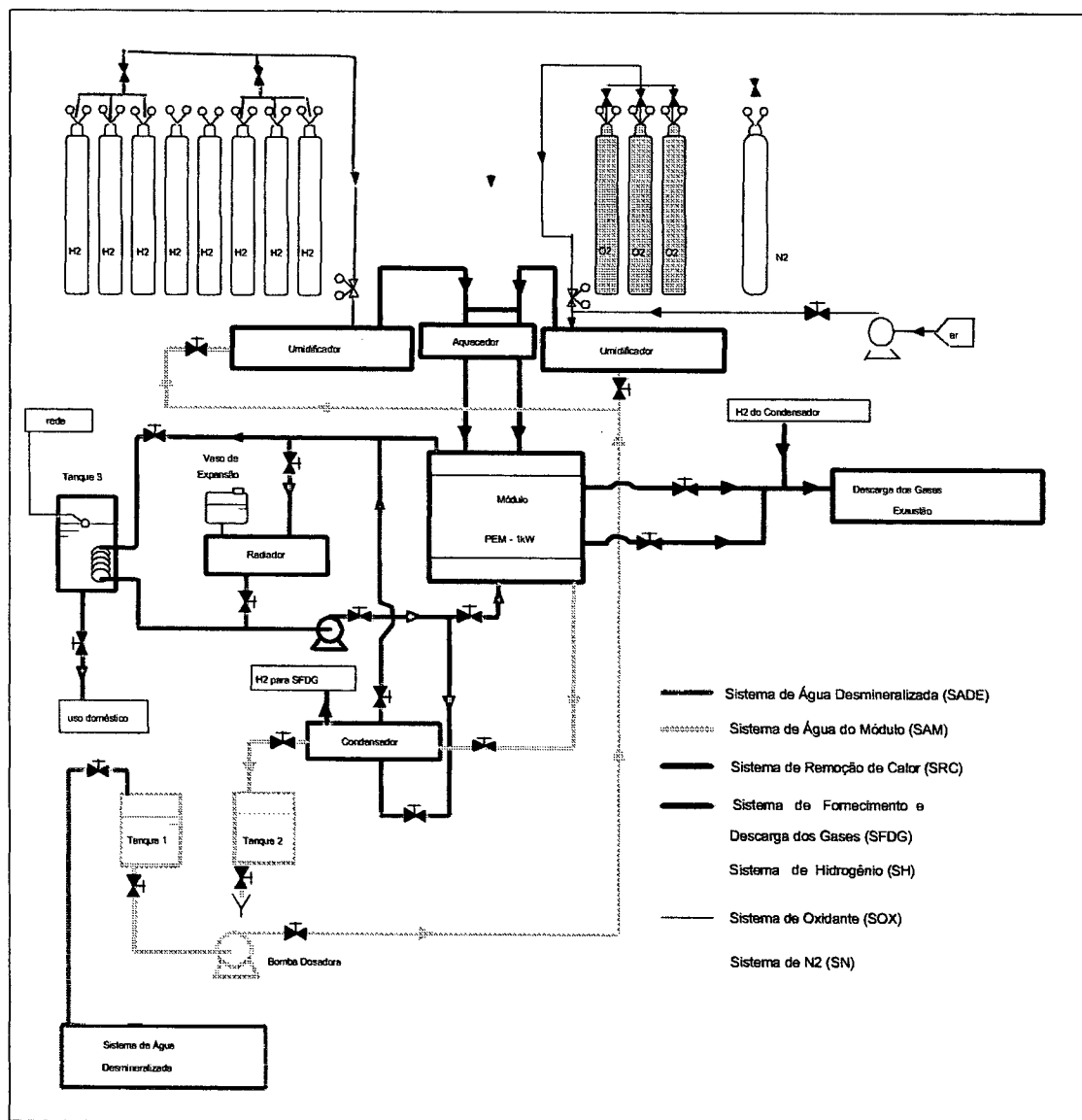


Figura 1. Fluxograma Esquemático dos Sistemas Auxiliares do Módulo PEM 1 kW.

2.1. Sistema de Água do Módulo (SAM)

O sistema de água tem como funções o fornecimento de água desmineralizada para os umidificadores do Sistema de Fornecimento e Descarga dos Gases (SFDG), e a retirada da água produzida no módulo. O SAM é constituído por 2 tanques de 50 litros cada. O tanque 1 armazena água desmineralizada produzida pelo Sistema de Água Desmineralizada

(SADE), descrito adiante, à temperatura ambiente, enquanto o tanque 2 armazena a água produzida no módulo a uma temperatura próxima da temperatura de operação do módulo: entre 70 e 80°C. O SAM possui uma bomba, um condensador, medidores de nível, de vazão, de temperatura e de pressão, além de válvulas de isolamento e de regulação.

A bomba fornece água, do tanque 1 para os umidificadores, a uma vazão de até $2,8 \times 10^{-4}$ kg/s (1 l/h). A água produzida nas células do módulo, juntamente com a água utilizada na umidificação das membranas, é retirada por meio de um coletor e enviada ao condensador, sendo em seguida armazenada no tanque 2. O resfriamento do condensador é feito pelo Sistema de Remoção de Calor (SRC).

2.2. Sistema de Água Desmineralizada (SADE)

O módulo utilizará água desmineralizada para evitar contaminação das MEA's por produtos presentes na água potável. O SADE tem como função fornecer água desmineralizada ao SAM a uma vazão de até $1,39 \times 10^{-3}$ kg/s (5 l/h). Será adquirido um sistema de resinas de troca iônica disponível no mercado.

2.3. Sistema de Remoção de Calor (SRC)

O SRC tem a função de remover o calor gerado nas células do módulo durante a operação, mantendo a temperatura estável e nas condições desejadas.

Em função da pequena carga térmica a ser retirada (< 2 kW), serão estudadas e avaliadas duas opções de SRC. Na primeira o resfriamento é realizado por um sistema fechado de circulação de água, e na segunda o resfriamento é feito por circulação forçada de ar. Apesar de o sistema de água apresentar maiores dificuldades do ponto de vista construtivo, o resfriamento por água apresenta a vantagem de maior facilidade para a realização do balanço térmico do módulo além de ser importante seu estudo para melhor aproveitamento energético.

O resfriamento por ar é mais simples e deve ser considerado como alternativa para os testes. Consiste de um sistema de circulação forçada e exaustão de ar e considera placas de resfriamento de carbono perfuradas. O ar é introduzido no módulo e se distribui nessas placas permitindo o resfriamento uniforme em cada uma das células. O ar quente produzido é liberado para o meio ambiente, podendo ser aproveitado para aquecimento de ambientes, principalmente em países de clima frio. O resfriamento por ar será implantado em fase posterior.

A opção de SRC utilizando água mostrada na Fig. (1), consiste de uma bomba centrífuga, um radiador com ventilador acoplado para dissipação do calor e um vaso para expansão do fluido. Internamente ao módulo, o sistema conta com placas de carbono entre células adjacentes com canais perfurados por onde passa a água para o resfriamento. Os canais são interligados por tubos externos como mostra a Fig. (2), retirada do site (www.kettering.edu) sobre resfriamento de células a combustível. O SRC também promove o resfriamento do condensador do SAM. O sistema será projetado de forma a permitir a realização de balanço térmico para a análise de eficiência do módulo. O sistema ainda prevê o aproveitamento do calor gerado para o aquecimento de água (Tanque 3) para uso doméstico, melhorando assim o rendimento global do módulo. As condições de projeto do SRC são: calor a ser removido ≤ 2 kW; vazão de água de resfriamento de $2,8 \times 10^{-1}$ kg/s (1 m³/h); temperatura da água entre 40 e 80°C; e pressão de 1,1 bar.

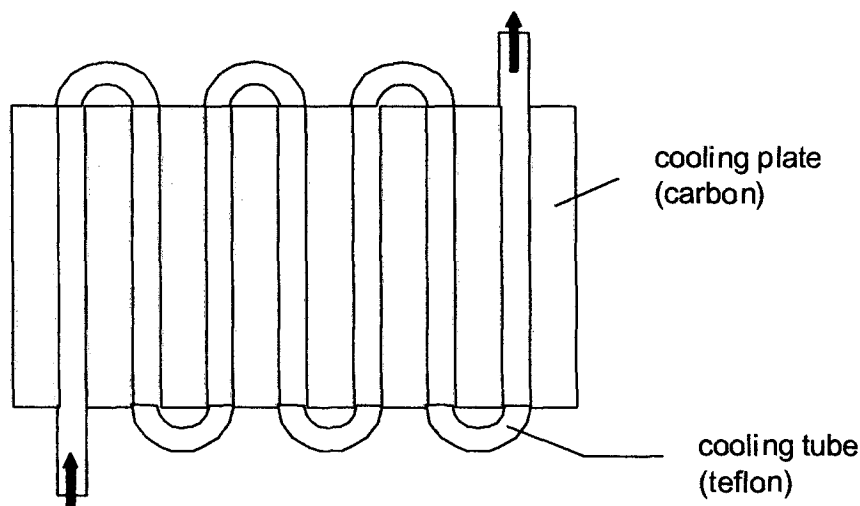


Figura 2. Representação das Placas de Refrigeração de Carbono – Sistema a Água.

2.4. Sistema de Fornecimento e Descarga dos Gases (SFDG)

O SFDG tem como função o fornecimento, de forma controlada, e a descarga dos gases combustível e oxidante do módulo. Esse sistema conta com controladores de vazão, dois umidificadores, resistências elétricas ao redor das tubulações de gases, medidores de temperatura, isolamento térmico e tubulações.

Vazão dos gases: o sistema prevê o controle da vazão dos gases, que será feito por meio de conjuntos de medição e por controladores de vazão como os da MKS Instruments, site (www.mksinst.com)

Umidação dos gases: a umidificação dos gases, fundamental para a operação das membranas das células, será feita usando dois umidificadores externos, conforme recomenda Susai T. e Kaneko M. et al (2001), um para o gás combustível e outro para o gás oxidante, adquiridos de fornecedores especializados como a Lynntech (www.lynn-tech.com) ou a EletroChem (www.fuelcell.com).

Temperatura de entrada dos gases: a temperatura de entrada dos gases na célula é um importante fator associado à sua eficiência, portanto é necessário o seu controle. O processo de umidificação envolve um pré-aquecimento dos gases com um controle fino da temperatura que será feito por meio de resistências elétricas instaladas externamente à tubulação que liga os umidificadores ao módulo, a qual é isolada termicamente.

Distribuição dos gases nas células do módulo: a distribuição dos gases para as células do módulo será feita por meio de cabeçotes de distribuição. Esses cabeçotes serão ainda desenvolvidos.

Controle da descarga dos gases do módulo: na descarga dos gases está prevista a instalação de válvulas de regulagem para o controle da pressão nas células. A exaustão do H₂ deve ser realizada com segurança para evitar qualquer risco de explosão.

As condições de operação para o módulo operando a 1 kW elétrico são:

- vazão de H₂ = 7,9 x 10⁻² kg/h;
- vazão de O₂ = 6,271 x 10⁻¹ kg/h;
- vazão de ar = 2,707 kg/h (ar seco com 21 % de O₂ em volume);
- pressão de fornecimento dos gases (H₂ e O₂ ou ar) = 1 a 1,1 bar, e,
- temperatura de aquecimento dos gases entre 60 e 90 °C.

2.5. Sistema de Hidrogênio (SH)

Esse sistema tem por função fornecer gás combustível (hidrogênio puro 99,999%) ao módulo e é constituído por duas baterias de cilindros, cada uma com 4 unidades de 10 Nm³. O sistema com essa capacidade permite operar o módulo, continuamente, pelo período de uma semana. Enquanto uma bateria está alinhada em operação, a outra permanece em reserva. O sistema prevê instrumentos com alarme para indicar o volume de gás presente em cada uma das baterias. Isso permitirá realizar o realinhamento do sistema para a bateria reserva e o reabastecimento da bateria vazia, permitindo continuidade de operação do módulo.

Os cilindros são fornecidos com pressão de 20 MPa (200 bar). A redução da pressão para utilização é feita em dois estágios por meio de válvulas reguladoras de pressão. No primeiro estágio, a pressão é reduzida para ~1,8 MPa (18 bar) e no segundo estágio para ~ 0,11 MPa (1,1 bar). Os cilindros ficarão sob proteção em um abrigo especialmente construído conforme estabelecem as normas de segurança.

O cálculo preliminar do consumo de gás combustível é apresentado na seção 3 e foi baseado na (Fuel Cell Handbook, 2000). As condições de operação são:

- vazão de H₂ = 7,9 x 10⁻² kg/h (coeficiente de utilização = 80%); e;
- pressão de fornecimento entre 1 e 1,1 bar.

2.6. Sistema do Oxidante (SOX)

Esse sistema é responsável pelo fornecimento do gás oxidante. O sistema prevê a utilização tanto de oxigênio, O₂ (99,999%), quanto de ar filtrado, por meio de circuitos independentes. Essa dupla possibilidade permite avaliar a operação e eficiência do módulo e sua durabilidade em relação a esses dois oxidantes.

O circuito de O₂ possui 3 cilindros com 10 Nm³ cada, e também tem capacidade para abastecimento contínuo por um período de uma semana. Durante a operação utiliza-se apenas um cilindro ficando os demais de reserva. O circuito prevê instrumentos com alarme para indicar o volume de gás presente nos cilindros para realizar o realinhamento e a substituição dos vazios. Os cilindros são fornecidos com uma pressão de 20 MPa (200 bar) e a redução da pressão é feita em dois estágios por meio de válvulas reguladoras de pressão. No primeiro estágio, a pressão é reduzida para ~ 1,8 MPa (18 bar) e no segundo estágio para ~ 0,11 MPa (1,1 bar). Os cilindros ficarão em um abrigo especialmente construído, conforme normas de segurança.

O cálculo preliminar do consumo de gás oxidante é apresentado na seção 3, (Fuel Cell Handbook, 2000). As condições de operação são as seguintes:

- vazão de O₂ = 6,271 x 10⁻¹ kg/h (coeficiente de utilização = 80%); e,
- pressão de fornecimento entre 0,1 e 0,11 MPa.

3.4. Eficiência do módulo sem aproveitamento do calor gerado:

Na condição nominal de 25°C (298 K) e 1 atmosfera, a energia química (ΔH) da reação oxigênio/hidrogênio é igual a 285,8 kJ/mole e a energia livre disponível para uso (ΔG) é igual a 237,1 kJ/mole. Desse modo, a eficiência térmica ideal (η_{ideal}) de uma célula combustível operando reversivelmente com hidrogênio e oxigênio puros pode ser calculada pela Eq. (12).

$$\eta_{ideal} = \Delta G / \Delta H = 237,1 / 285,8 = 0,83 \quad (12)$$

A eficiência real (η_{real}) pode ser expressa em termos da razão da tensão de operação ($V_{oper.}$) pela tensão ideal (V_{ideal}) da célula. A tensão de operação é menor do que a tensão ideal porque existem perdas associadas à polarização da célula e perdas resistivas. A eficiência real pode ser expressa em termos da tensão de operação, Eq. (13) e (14).

$$\eta_{real} = \text{Energia Disponível} / \Delta H = \text{Energia Disponível} / (\Delta G / 0,83) \quad (13)$$

$$\eta_{real} = (V_{oper.} \times \text{corrente}) / (V_{ideal.} \times \text{corrente} / 0,83) = 0,83 V_{oper.} / V_{ideal.} \quad (14)$$

As células do tipo PEM apresentam os seguintes valores típicos: tensão ideal ($V_{ideal.} = 1,23$ V) e tensão de operação ($V_{oper.} = 0,7$ V), além de um coeficiente de utilização (U) entre 80 e 95 %. Nos cálculos de consumo de gases utilizou-se $U = 80\%$. Substituindo esses valores na Eq. (14), obtém-se:

$$\eta_{real} = 0,80 \times 0,83 V_{oper.} / V_{ideal} = 0,80 \times 0,83 \times 0,7 / 1,23 = 0,378 = 37,8\% \quad (15)$$

A Tabela 1 resume as principais características dos sistemas previstos para o módulo PEM de 1 kW elétrico.

Tabela 1. Características dos sistemas para o módulo PEM de 1 kW.

Consumo de H ₂ (kg/h) / coeficiente de utilização (%)	7,9 x 10 ⁻² / 80
Consumo de O ₂ (kg/h) / coeficiente de utilização (%)	6,271 x 10 ⁻¹ / 80
Consumo de Ar (kg/h) / coeficiente de utilização (%)	2,707 / 80
Faixa de temperatura de operação do módulo (°C)	60 - 90
Vazão de água de resfriamento (kg/s)	2,8 x 10 ⁻¹
Vazão de água para umidificadores (kg/s)	2,8 x 10 ⁻⁴
Rendimento da conversão elétrica (contínua/alternada) (%)	85
Eficiência do módulo (%) – sem aproveitamento do calor	37,8

4. Conclusões

O desenvolvimento de módulos de células a combustível para uso doméstico deve considerar potências da ordem de 1 kW a 1,5 kW. O aproveitamento da energia gerada no módulo, na forma de eletricidade e na forma de calor pode fazer com que esse tipo de geração seja muito interessante devido ao elevado rendimento possível.

Para esse desenvolvimento são necessários extensivos testes que permitam a otimização de parâmetros operacionais e a demonstração da confiabilidade e disponibilidade de módulos nessa faixa de potência e para isso é necessária a construção de bancadas de teste como a proposta neste trabalho.

O projeto dos sistemas apresentados nesse trabalho considerou um coeficiente de utilização dos gases (U) de 80% e um rendimento de 85% na conversão da corrente contínua para alternada. Estudos adicionais serão feitos para verificar se esse valor de U é adequado, assim como o rendimento de conversão. A instrumentação dos sistemas auxiliares do módulo também é objeto de outro estudo em planejamento.

Para este sistema, o dimensionamento efetuado concluiu pela utilização de duas baterias de 4 cilindros cada para o H₂ (combustível) e três cilindros de O₂ (oxidante), além um cilindro de N₂, que será usado para a purga do sistema. O sistema assim dimensionado permitirá operar o módulo de forma contínua por um período de uma semana, sem necessidade de reabastecimento de gases.

5. Referências

- Fuel Cell Handbook (Fifth Edition) by EG&G Services, Parsons, Inc., Science Applications International Corporation – Under Contract no. DE-AM26-99FT40575 – U.S. Department of Energy – october 2000.
- Susai, T., Kawakami, A., Miyake, Y. and Azegami, Y., 2001, "Development of a 1kW Polymer Electrolyte Fuel Cell Power Source" – Journal of Power Source, Vol. 92, pp. 131 – 138.
- Susai, T., Kaneko, M., Nakato, K., Isono, T., Hamada, A. and Miyake, Y., 2001, "Optimization of Proton Exchange Membranes and the Humidifying Conditions to Improve Cell Performance for Polymer Electrolyte Fuel Cells" – International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 26, pp. 631-637.

Wendt, H., Güiz, M. and Linardi, M., 2000, "Tecnologia de Células a Combustível" – Revista Química Nova 23(4)2000 pg. 538-546

DEVELOPMENT OF THE SYSTEMS FOR A 1 kW ELECTRIC PEM MODULE

Walmir Maximo Torres

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Av. Prof. Lineu Prestes 2242 – Cidade Universitária – São Paulo – SP – Brasil – 05508-900
wmtorres@net.ipen.br

Eduardo Maprelian

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Av. Prof. Lineu Prestes 2242 – Cidade Universitária – São Paulo – SP – Brasil – 05508-900
emapreli@net.ipen.br

Luiz Alberto Macedo

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Av. Prof. Lineu Prestes 2242 – Cidade Universitária – São Paulo – SP – Brasil – 05508-900
lamacedo@net.ipen.br

Benedito Dias Baptista Filho

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Av. Prof. Lineu Prestes 2242 – Cidade Universitária – São Paulo – SP – Brasil – 05508-900
bdbfilho@net.ipen.br

Abstract. *This paper presents the conceptual design of the necessary systems for the operation and for the performance tests of a PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cells module of 1 kW of electric power. The most important systems discussed are: gases supply systems, feed water system and heat removal system. The estimative of gases consumption and module efficiency are also presented.*

Keywords. *Fuel cells, systems, PEM.*