

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
wmtorres@net.ipen.br

Eduardo Maprelian

IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Centro de Engenharia Nuclear
Av. Prof. Lineu Prestes 2242 – Cidade Universitária – São Paulo – SP – Brasil – 05508-900
emaprel@net.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@net.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@net.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.ballard.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 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 (Wendt et al 2000), (Wendt et al 2002). No momento, dois projetos estão em andamento, um pela FAPESP e outro pelo Fundo Setorial de Petróleo (CTPETROS), com resultados ainda não publicados. 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 ou empilhamento (stack) 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 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 ou empilhamento (stack) de células a combustível proposto consiste de um conjunto de células 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.

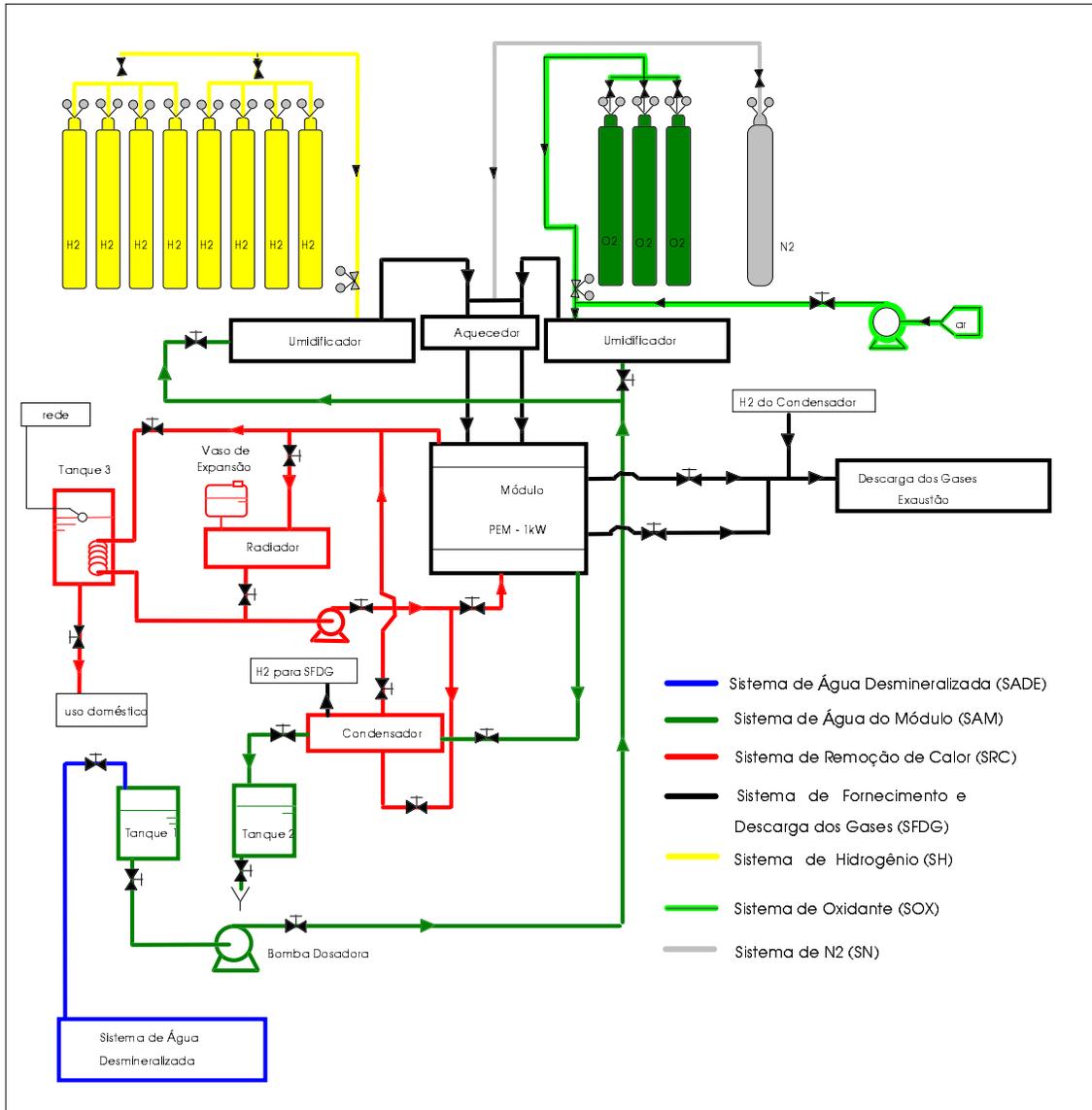


Figura 1. Fluxograma Esquemático dos Sistemas Auxiliares do Módulo PEM 1 kW.

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)

Por se tratar de uma instalação experimental em laboratório, o módulo utilizará água desmineralizada para evitar contaminação das MEA's por impurezas presentes na água, e para que se tenha condições controladas da água utilizada (Fuel Cell Handbook, 2000). 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.

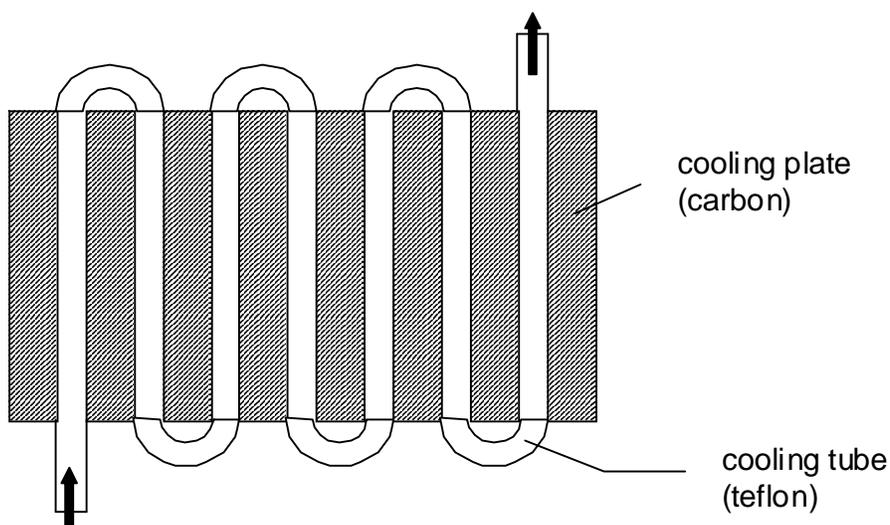


Figura 2. Representação das Placas de Refrigeração de Carbono – Sistema a Água.

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.lynntech.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 regulação para o controle da pressão nas células. A exaustão do H_2 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 $H_2 = 7,9 \times 10^{-2}$ kg/h;
- vazão de $O_2 = 6,271 \times 10^{-1}$ kg/h;
- vazão de ar = 2,707 kg/h (ar seco com 21 % de O_2 em volume);
- pressão de fornecimento dos gases (H_2 e O_2 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 Nm^3 . 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 $H_2 = 7,9 \times 10^{-2}$ 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, O_2 (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 O_2 possui 3 cilindros com 10 Nm^3 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 $O_2 = 6,271 \times 10^{-1}$ kg/h (coeficiente de utilização = 80%); e,
- pressão de fornecimento entre 0,1 e 0,11 MPa.

O circuito de ar consiste de um insuflador, filtros de ar, válvulas de regulação e tubulações. Com base em (Fuel Cell Handbook, 2000), os cálculos preliminares são apresentados na seção 3 considerando ar seco com 21% de O₂ em volume. As condições de operação são as seguintes:

- vazão de ar = 2,707 kg/h (coeficiente de utilização = 80%); e,
- pressão de fornecimento entre 0,1 e 0,11 MPa.

2.7. Sistema de Nitrogênio (SN)

Esse sistema tem a função de fornecer N₂ para realizar a purga do H₂ do SFDG e principalmente do módulo, antes e após cada operação, de modo a evitar a degradação dos componentes devido principalmente à difusão do H₂ do ânodo para o cátodo. (Fuel Cell Handbook, 2000), bem como evitar acidentes com H₂ residual. Esse sistema possui um cilindro de N₂ com capacidade de 10 Nm³, que é fornecido com uma pressão de 200 bar. Para a sua utilização também são necessários dois estágios de redução de pressão usando válvulas reguladoras de pressão, como mencionado nos sistemas anteriores.

2.8. Sistema de Exaustão de Hidrogênio (SEH)

Esse sistema tem como função realizar a exaustão do H₂ em excesso, ou de vazamentos, de forma segura para a atmosfera. O SEH consiste de uma coifa instalada sobre o módulo e o SFDG, um exaustor do tipo passivo, tubulações e detectores de H₂.

2.9. Sistema de Aquisição de Dados (SAD)

Esse sistema tem a função de coletar e registrar os dados de operação, como vazões, temperaturas, pressões, tensões e correntes elétricas, para posterior análise. Para esse sistema são previstos dois microcomputadores, sendo um para operação na bancada experimental, dotado de placa de aquisição de dados e software para tratamento de dados, e outro para análises no laboratório.

3. Dimensionamento

Os cálculos à seguir foram realizados com base no roteiro do manual: (Fuel Cell Handbook, 2000), e fornecem a estimativa do consumo de gases para uma célula do tipo PEM de 1kW elétrico.

3.1. Hidrogênio (Fuel Cell Handbook, 2000)

Para cada molécula de H₂ que reage dentro da célula, são liberados dois elétrons no ânodo da célula. A solução do problema requer o conhecimento da definição de corrente elétrica (1 A) e do um equivalente de elétrons, dadas abaixo:

$$1 \text{ equivalente de elétrons} = 1 \text{ grama mol de elétrons} = 6,022 \times 10^{23} \text{ elétrons}$$

O equivalente de elétrons tem uma carga de 96.487 C (constante de Faraday), portanto a carga de um elétron é igual a $1,602 \times 10^{-19}$ C, e 1 Ampère = 1 C/s.

A que ocorre reação no ânodo é dada pela Eq (1).



O número de moles de H₂ (n_{H2}) consumido por hora pode ser calculado usando a Eq. (2).

$$n_{\text{H}_2} = (1 \text{ A}) \cdot [(1 \text{ C/s}) / (1 \text{ A})] \cdot [1 \text{ eq. de elétrons} / 96.487 \text{ C}] \cdot [1 \text{ g mol H}_2 / 2 \text{ eq. de elétrons}] \cdot [3600 \text{ s} / 1 \text{ h}] \quad (2)$$

$$n_{\text{H}_2} = 1,866 \times 10^{-2} \text{ (g mol H}_2 / \text{ A.h)}$$

Para uma célula com uma corrente de 1 A, n_{H2} = 1,866 x 10⁻² (g mol H₂ / A.h). A correspondente massa de H₂ (m_{H2}) pode ser calculada usando a Eq. (3):

$$m_{\text{H}_2} = (1,866 \times 10^{-2} \text{ g mol H}_2 / \text{ A.h}) \cdot (2,0158 \text{ g} / 1 \text{ g mol H}_2) \cdot (1 \text{ kg} / 1000 \text{ g}) \quad (3)$$

$$m_{\text{H}_2} = 3,761 \times 10^{-5} \text{ (kg H}_2 / \text{ A.h)}$$

Para obter o consumo no módulo considera-se que as células estão dispostas em paralelo, ou seja, a tensão elétrica no módulo é igual à tensão na célula e a corrente é igual à soma das correntes em cada célula. A potência gerada no módulo (PM) pode ser calculada pela Eq. (4).

$$PM = V \cdot I \quad (4)$$

onde V é a tensão no módulo e I é a soma das correntes nas células.

Considerando que a tensão de operação em uma célula do tipo PEM seja da ordem de 0,7 V (valor característico obtido da curva de polarização da célula) e que a potência (PM) desejada é de 1 kW, e considerando ainda que o rendimento do conversor de corrente contínua para corrente alternada seja 85%, conforme (Susai T, Kawakami A. et al, 2001), obtém-se a corrente (I) no módulo, substituindo os valores na Eq. (4):

$$I = PM / V = 1000 / (0,7 \times 0,85) = 1680,67 \text{ A}$$

A massa de H₂ consumida no módulo por hora (M_{H2})_{consumida} pode ser calculada usando a Eq. (5).

$$(M_{H2})_{consumida} = m_{H2} \cdot I \quad (5)$$

$$(M_{H2})_{consumida} = 3,761 \times 10^{-5} \text{ (kg H}_2\text{/ A.h)} \cdot (1680,67 \text{ A}) = 6,321 \times 10^{-2} \text{ (kg H}_2\text{/h)}$$

O consumo de hidrogênio estimado em Nm³/h para 1 kWe gerado é de:

$$(Q_{H2})_{consumido} = 7,718 \text{ (Nm}^3\text{/h/kW)}$$

Considerando que o H₂ deve ser fornecido com excesso e um coeficiente de utilização (U) igual a 80%, a massa de H₂ fornecida por hora (M_{H2})_{fornecida} pode ser calculada pela Eq. (6).

$$(M_{H2})_{fornecida} = (M_{H2})_{consumida} / 0,8 \quad (6)$$

$$(M_{H2})_{fornecida} = 7,9 \times 10^{-2} \text{ (kg H}_2\text{/ h)}$$

$$(Q_{H2})_{fornecida} = 9,648 \text{ (Nm}^3\text{/h/kW)}$$

3.2. Oxigênio (Fuel Cell Handbook, 2000)

Para determinar a massa de O₂ consumida no módulo, (M_{O2})_{consumida}, deve-se observar a razão estequiométrica (2:1) da reação do hidrogênio com o oxigênio na membrana. Portanto, o número de moles de O₂ (n_{O2}) consumido na célula é dado pela Eq. (7).

$$n_{O2} = (6,321 \times 10^{-2} \text{ kg H}_2\text{/ h}) \cdot (1 \text{ kg mol H}_2\text{/ 2,0158 kg H}_2) \cdot (1 \text{ kg mol O}_2\text{/ 2 kg mol H}_2) \quad (7)$$

$$n_{O2} = 1,568 \times 10^{-2} \text{ (kg mol O}_2\text{/ h)}$$

Substituindo o valor do kg mol O₂ pela massa correspondente de oxigênio na Eq. (7), obtém-se a massa de O₂ consumida no módulo por hora (M_{O2})_{consumida}, que é dada pela Eq. (8).

$$(M_{O2})_{consumida} = 1,568 \times 10^{-2} \text{ (kg mol O}_2\text{/ h)} \cdot (31,9988 \text{ kg / kg mol O}_2) \quad (8)$$

$$(M_{O2})_{consumida} = 5,017 \times 10^{-1} \text{ kg O}_2\text{/ h}$$

O consumo de oxigênio estimado em Nm³/h para 1 kWe gerado é de:

$$(Q_{O2})_{consumido} = 3,857 \times 10^{-1} \text{ (Nm}^3\text{/h/kW)}$$

Considerando que o O₂ deve ser fornecido ao módulo em excesso e o coeficiente de utilização (U) igual a 80%, a massa de O₂ fornecida por hora (M_{O2})_{fornecida} deve ser calculada pela Eq. (9).

$$(M_{O2})_{fornecida} = (M_{O2})_{consumida} / 0,8 \quad (9)$$

$$(M_{O2})_{fornecida} = 6,271 \times 10^{-1} \text{ (kg O}_2\text{/h)}$$

$$(Q_{O2})_{fornecida} = 4,821 \times 10^{-1} \text{ (Nm}^3\text{/h/kW)}$$

3.3. Ar (Fuel Cell Handbook, 2000)

O cálculo do consumo de ar considera uma porcentagem de 21% de O₂ no ar. Deve-se observar a razão estequiométrica (2:1) da reação na membrana do hidrogênio para o oxigênio. A massa de ar consumida no módulo ((M_{Ar})_{consumida}) é calculada pela Eq. (10).

$$(M_{Ar})_{consumida} = 1,568 \times 10^{-2} \text{ (kg mol O}_2 \text{ / h)} \cdot (1 \text{ kg mol Ar / } 0,21 \text{ kg mol Ar)} \cdot (29 \text{ kg Ar / } 1 \text{ kg mol Ar)} \quad (10)$$

$$(M_{Ar})_{consumida} = 2,165 \text{ (kg ar / h)}$$

O consumo de ar estimado em Nm³/h para 1 kW_e gerado é de:

$$(Q_{Ar})_{consumido} = 1,839 \text{ (Nm}^3\text{/h/kW)}$$

Considerando que o ar deve ser fornecido ao módulo em excesso e o coeficiente de utilização (U) de 80%, a massa de ar fornecida por hora ((M_{Ar})_{fornecida}) pode ser calculada pela Eq. (11).

$$(M_{Ar})_{fornecida} = (M_{Ar})_{consumida} / 0,8 \quad (11)$$

$$(M_{Ar})_{fornecida} = 2,707 \text{ (kg ar / h)}$$

$$(Q_{Ar})_{fornecida} = 2,298 \text{ (Nm}^3\text{/h/kW)}$$

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
- Wendt, H., Linardi, M. and Aricó, E.M., 2002, “Células a Combustível de Baixa Potência para Aplicações Estacionárias” – Revista Química Nova 25(3)2002 pg. 470-476

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
emaprel@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.*