

Balço de planta para microgerador PaCOS alimentado com etanol

Alberto Coralli¹, Paulo Emílio Valadão de Miranda¹

¹ Laboratório de Hidrogênio - Labh2 – PEMM/COPPE/UFRJ CP: 68505 – 21941-972, Rio de Janeiro, RJ
e-mail: alberto.coralli@labh2.coppe.ufrj.br

RESUMO

As Pilhas a Combustível de Óxido Sólido (PaCOS) são conversores eletroquímicos particularmente adequados para a cogeração estacionária de energias elétrica e térmica com alta eficiência e baixo impacto ambiental, empregando diferentes combustíveis. No Brasil o uso de geradores PaCOS pode gerar benefícios ambientais e econômicos em várias situações; atributos que podem favorecer a difusão deles no país são a alimentação com etanol e a priorização da produção elétrica sobre a térmica. Nessa perspectiva, foi empreendido o desenvolvimento de um sistema PaCOS de microcogeração elétrica (500 W) alimentado com etanol, com eficiência comparável às tecnologias convencionais (superior a 30 %). Característica importante do projeto é a estrutura híbrida, com baterias capazes de satisfazer as oscilações da carga elétrica sem requerer variações da potência da pilha. O sistema funcionará utilizando diretamente o combustível, sem processamento químico externo ao empilhamento, coisa que simplifica e diminui o custo do protótipo. Depois da pesquisa bibliográfica, foi formulado um modelo matemático do sistema, para avaliar diferentes topologias construtivas e buscar os melhores parâmetros operacionais. Baseando-se na simulação, foram adquiridos ou projetados os componentes auxiliares do sistema. Foram testados uma bomba, dois sopradores e um inversor comerciais, que resultaram adequados à aplicação. Os trocadores de calor, o conversor CC/CC necessário para conectar o empilhamento às baterias e o sistema de controle do protótipo foram projetados. Dois modelos de PaCOS comerciais foram testados com hidrogênio e com uma mistura de água e etanol, confirmando o funcionamento adequado da bancada de teste e comprovando a viabilidade da operação em regime de reforma interna do etanol. Foi verificado que, apesar de ser possível, a substituição do hidrogênio com etanol acarreta relevantes problemas como redução da potência máxima e instabilidade no funcionamento. Os resultados obtidos completam os dados presentes na literatura sobre o funcionamento de PaCOS alimentadas com etanol e vapor.

Palavras-chave: Pilha a Combustível de Óxido Sólido, Etanol, Microgeração, Balço de Planta.

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia das PaCOS é globalmente reconhecida como promissora na área da geração elétrica de alta eficiência e baixo impacto ambiental, sendo particularmente adequada para a geração estacionária com diferentes combustíveis [1], incluindo o etanol. No Brasil, geradores PaCOS poderiam ser aplicados em várias situações produzindo benefícios ambientais e econômicos [2] e existe uma ampla infraestrutura de produção e uso de etanol [3], um combustível líquido de logística simples e baixa toxicidade. Nessa perspectiva, foi empreendido um projeto de pesquisa focado no desenvolvimento de um gerador elétrico PaCOS alimentado com etanol de potência na faixa da microcogeração. Características importantes do sistema serão a estrutura híbrida, com baterias que satisfazem as oscilações da carga elétrica sem requerer variações da potência produzida pela pilha [4], e a utilização direta do etanol sem processamento químico externo, que torna a estrutura do sistema mais simples [5]. Na bibliografia existente foram identificados vários modelos teóricos de sistemas de geração elétrica com PaCOS alimentadas com etanol [6-11] e estudos experimentais de pilhas a combustível unitárias com características adequadas à operação com etanol anidro [12-15] ou hidratado [16-19]. Pelo outro lado, não foram identificados trabalhos focados em resultados experimentais da operação de empilhamentos comerciais ou laboratoriais com etanol como combustível (tanto puro quanto misturado com água). Utilizando os dados recolhidos (em particular as estruturas dos sistemas objeto das análises teóricas) foi formulado um modelo matemático simplificado do sistema [20], que permitiu avaliar os parâmetros operacionais ótimos e a melhor topologia construtiva (Figura 1). A simulação sugeriu que a solução mais adequada para o projeto seria a operação com etanol puro, viabilizada pelo anodo proprietário desenvolvido no Laboratório de Hidrogênio especificamente para evitar a deposição de carbono sólido no uso de etanol anidro em

PaCOS [12]. Esse material foi testado em nível de pilha unitária, gerando resultados satisfatórios, mas o desenvolvimento de um empilhamento utilizando ele ainda não foi completado. Em paralelo a esse desenvolvimento foi então decidido adquirir empilhamentos comerciais projetados para hidrogênio e testa-los com uma mistura de etanol e água como combustível, aproveitando a capacidade dos anodos comerciais em efetuar reforma interna [1]. O objetivo dos testes foi experimentar a operação prática de um empilhamento com etanol, preenchendo uma lacuna na literatura da área e obtendo informações sobre o projeto do balanço de planta necessário. Além disso, foram coletados dados para comparação com um futuro empilhamento com o material anódico do Laboratório de Hidrogênio.

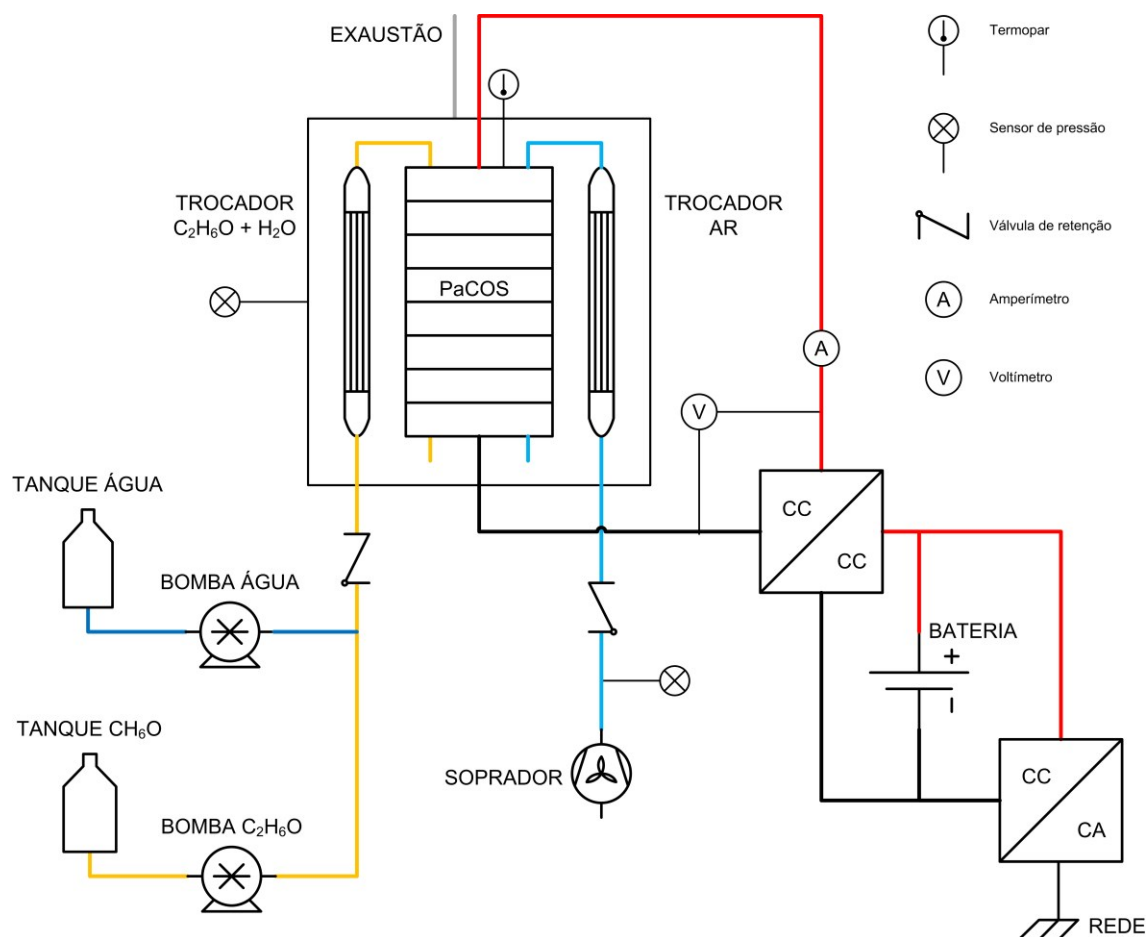


Figura 1: Estrutura do sistema de geração PaCOS.

No entanto, a pesquisa continuou com a fase de aquisição, construção e teste dos componentes do Balanço de Planta (BdP) do sistema (o conjunto de equipamentos auxiliares que permitem o funcionamento da PaCOS). Um modelo de bomba, um de inversor e dois de soprador de ar foram testados com êxito, resultando adequados à aplicação. Os trocadores de calor e o conversor CC/CC necessários para conectar o empilhamento às baterias foram projetados de acordo com as especificações definidas. Cuidou-se que todos os componentes, comerciais ou não, apresentassem a capacidade de funcionar em um amplo intervalo de condições, garantindo a possibilidade de seguir eventuais desvios do ponto de funcionamento de projeto.

Nesse artigo são reportados os resultados das provas experimentais dos componentes do balanço de planta que foram adquiridos e testados e de dois empilhamentos PaCOS comerciais, alimentados antes com hidrogênio e depois com uma mistura de etanol e água. São também apresentados os métodos de design dos componentes do BdP que não foram encontrados no mercado e foram, conseqüentemente, projetados especificamente para a aplicação desejada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta a metodologia de teste dos componentes comerciais que foram operados na prática para caracterizar o funcionamento dos mesmos e verificar aderência às especificações fornecidas pelos fabricantes.

A seção também contém informações sobre os métodos usados para o projeto dos componentes que não foram encontrados no mercado.

2.1 Bombas peristálticas e sopradores

Alguns dos componentes do sistema que foram encontrados no mercado são as bombas d'água e de etanol e o soprador do ar. Tomando em conta o intervalo de vazão e pressão calculado nas simulações efetuadas, foram selecionados para testar um modelo de bomba peristáltica e dois modelos de soprador, todos com possibilidade de regular a vazão através de um sinal de controle. Uma vez adquiridos, os equipamentos foram testados em bancada para verificar a correspondência do comportamento experimental com o desempenho indicado pelos fabricantes e a adequação à aplicação desejada. Com esse intuito, foram levantadas as curvas vazão/pressão dos componentes, utilizando o sistema de teste indicado na Figura 2. Acionando a válvula, foi mudada a diferença de pressão enfrentada pela bomba (ou soprador), medindo em cada caso o fluxo de fluido gerado e a potência consumida pelo equipamento. A potência consumida foi calculada multiplicando a corrente absorvida pelo dispositivo e o nível de tensão correspondente, medidas utilizando um amperímetro e um voltímetro. Esse procedimento foi repetido para diferentes valores da velocidade de rotação do dispositivo testado, regulada através do valor de tensão do sinal de controle.

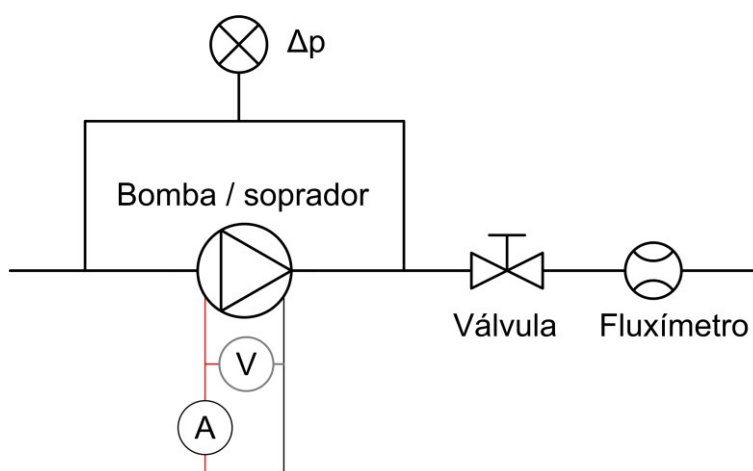


Figura 2: Sistema de teste da bomba peristáltica e dos sopradores de ar.

2.2 Evaporadores e trocadores de calor

Para alimentar o etanol e a água ao empilhamento PaCOS é necessário vaporizar esses líquidos. Para efetuar os testes em bancada dos empilhamentos comerciais, mencionados em seguida, isso foi feito empregando evaporadores aquecidos eletricamente, de simples instalação e controle.

Diferentemente da bancada de teste descrita a seguir, no projeto do protótipo a vaporização de etanol e água é realizada através de trocadores de calor, que aquecem os fluxos que entram no sistema aproveitando o calor residual dos fluxos que saem, garantindo uma maior eficiência do sistema. Não foi possível identificar modelos comerciais com características adequadas à aplicação; como consequência, foram projetados trocadores de calor específicos para o protótipo, utilizando para o dimensionamento o método da diferença de temperatura média logarítmica LMTD, definida como:

$$LMTD = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln(\Delta T_A) - \ln(\Delta T_B)} \quad (1)$$

Essa quantidade é utilizada para calcular a área de troca térmica, de acordo com a relação:

$$A_T = \frac{Q}{U_D \cdot LMTD} \quad (2)$$

onde Q indica o calor trocado entre os fluidos e U_D o coeficiente global de troca térmica, obtido através da equação (3):

$$U_D = \frac{1}{\frac{h_i + h_o}{h_i \cdot h_o} + R_d} \quad (3)$$

O fator de fuligem R_d introduz uma resistência adicional à passagem de calor, devida à formação de incrustações nas paredes do trocador de calor. Tabelas fornecem o valor de R_d em função dos fluidos e do material do trocador de calor. Os coeficientes de troca térmica h , por sua vez, são calculados a partir dos números adimensionais de Reynolds e Prandtl, através da relação:

$$h = \frac{0,027 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \cdot k}{D_e} \quad (4)$$

onde k é a condutividade térmica do fluido e D_e o diâmetro equivalente do duto.

2.3 Eletrônica de potência

A eletrônica de potência necessária ao funcionamento do sistema consta de duas partes principais: um conversor CC/CC, que compatibiliza o nível de tensão da pilha a combustível com o do banco de baterias; um inversor CC/CA, que transforma a corrente contínua que sai das baterias em corrente alternada. O inversor é necessário para poder alimentar cargas elétricas convencionais em corrente alternada.

No caso do inversor, foi possível adquirir um modelo comercial, que foi testado para verificar que o funcionamento fosse adequado às necessidades do projeto. Para fazer isso, o inversor foi conectado a um banco de baterias e a cargas elétricas, monitorando-se a tensão e a corrente na entrada e na saída do equipamento. O sistema de teste está esquematizado na figura 3.

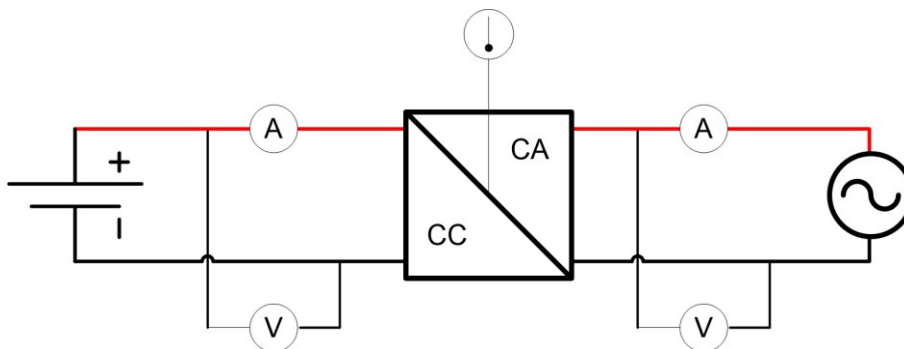


Figura 3: Sistema de testes do inversor CC/CA.

No caso do conversor CC/CC, não foi possível achar no mercado um modelo capaz de fornecer o intervalo de tensão requerido pelas baterias aceitando como input o amplo intervalo de tensão gerada pela pilha a combustível. Consequentemente, foi necessário projetar um conversor CC/CC específico para a aplicação desejada. Através de uma revisão bibliográfica foram selecionadas as topologias mais convenientes e foi realizado o projeto dos conversores de acordo com os métodos estabelecidos na literatura [21], que consideram todos os componentes como ideais, sem perdas ôhmicas. Os resultados dos cálculos foram validados com simulações computacionais, efetuadas com o software *Matlab-Simulink*, que permitiram também avaliar o funcionamento dos dois conversores com componentes reais, considerando as perdas ôhmicas.

2.4 Testes de empilhamentos comerciais

Para verificar o funcionamento adequado do sistema projetado, o balanço de planta será testado associado a empilhamentos PaCOS comerciais. Dois modelos de empilhamentos foram então testados em bancada, com o intuito de caracterizar completamente o funcionamento dele e verificar a possibilidade de utiliza-los no protótipo.

A bancada de teste empregada possui sensores de pressão, temperatura e fluxo, para monitorar as condições dos fluidos na entrada e na saída do empilhamento. Um volímetro e um amperímetro foram conectados à resistência variável utilizada como carga elétrica, para determinar a curva de polarização (tensão em

função da corrente produzida do empilhamento) em diferentes condições. Evaporadores elétricos foram empregados para vaporizar o etanol e a água alimentados. Um forno elétrico foi também utilizado para manter o empilhamento à temperatura desejada. A Figura 4 apresenta uma imagem da bancada de teste montada, enquanto na Figura 5 está representada a parte principal do sistema de controle no atual estado de desenvolvimento.

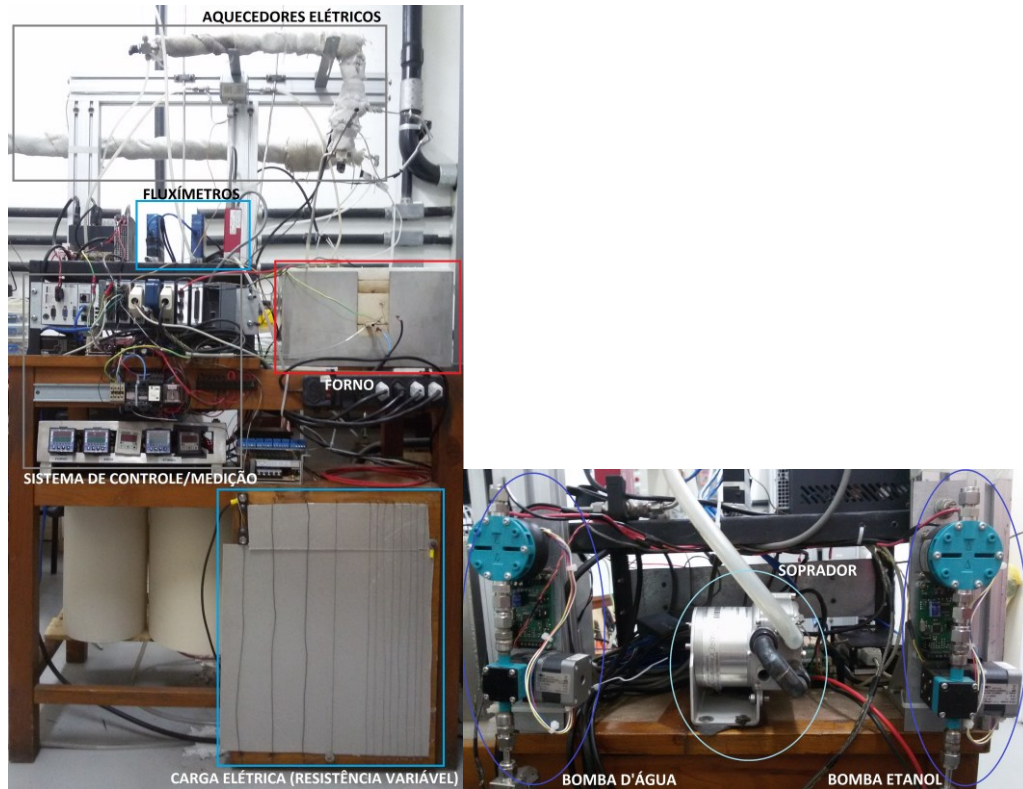


Figura 4: Bancada de testes para empilhamento PaCOS.

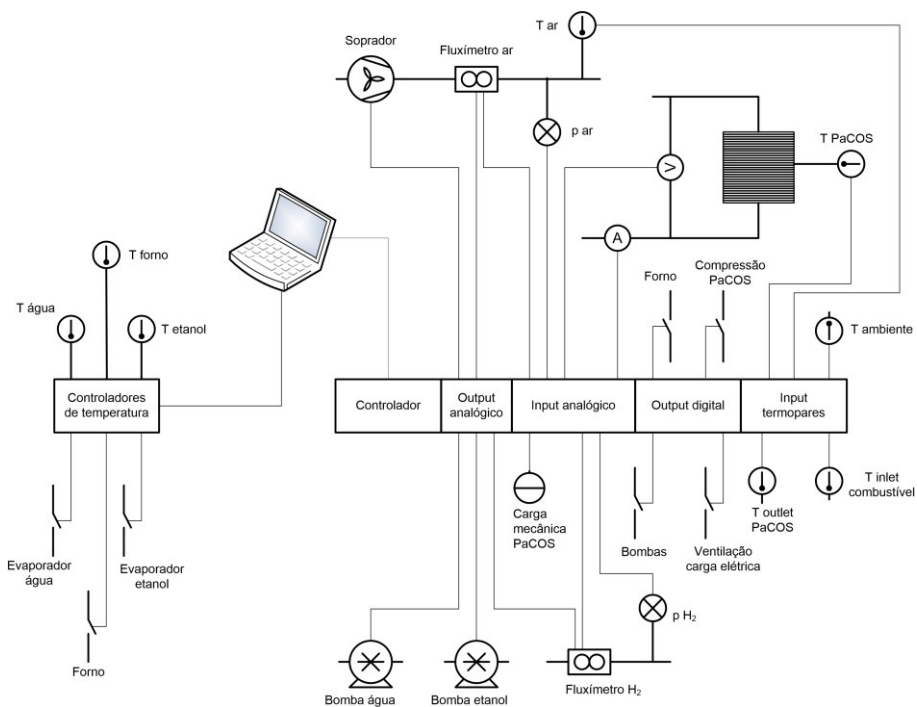


Figura 5: Sistema de controle da bancada de teste para empilhamento PaCOS.

O componente *hardware* principal do sistema de controle é o *CompactRIO* da *National Instruments*, um sistema modular e flexível equipado com *Field Programmable Gate Array* (FPGA) e controlador *real-time* que permite o gerenciamento de vários sinais de entrada e saída digitais e analógicos. O sistema inclui também outros componentes eletrônicos, que têm a função de compatibilizar os sinais de controle e medição do *CompactRIO* com os dos vários sensores e atuadores do sistema. São também utilizadas duas fontes CC/CC para gerar tensão de 12 V_{CC} e 5 V_{CC}, utilizada por alguns dispositivos, a partir do bus principal do sistema, de 24 V_{CC}. O *software* de controle da bancada foi desenvolvido com *LabVIEW*, linguagem de programação gráfica também da *National Instruments*. Essa estrutura constitui também uma primeira versão do controle do protótipo, que vai evoluir do sistema realizado para os testes. As pequenas modificações necessárias para o uso no protótipo completo serão feitas uma vez completada a fabricação de todos os componentes, na fase de finalização do protótipo.

3. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados experimentais dos equipamentos testados na prática, junto com os dados obtidos no projeto dos dispositivos que ainda não chegaram à fase de construção.

3.1 Bombas peristálticas e sopradores

Os testes da bomba peristáltica escolhida para alimentar o empilhamento com fluxos de etanol e água deram resultados satisfatórios. De fato, o modelo adquirido, a microbomba *KNF FEM 1.02* com amortecedor de pulsações *FPD06*, gerou vazão entre 2 e 15 ml/min, tanto de etanol quanto de água, com um consumo de potência reduzido (entre 6,6 e 7 W) e uma baixa oscilação de vazão (cerca de 0,2 ml/min). A vazão gerada e a potência consumida ficaram aproximadamente constantes com a variação da diferença de pressão entre entrada e saída da bomba, dependendo principalmente da velocidade de rotação do motor. No gráfico da Figura 6 são reportados os valores de vazão gerados em função do sinal de controle aplicado.

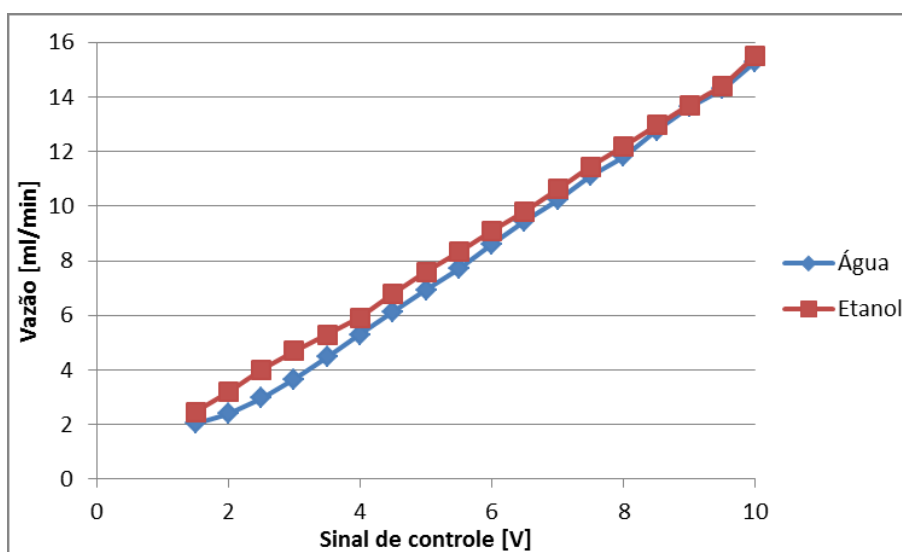


Figura 6: Vazão da bomba peristáltica em função do sinal de controle aplicado.

Relativamente ao soprador de ar, foram testados em bancada dois modelos diferentes, o *Vairex VRB2-2 48VCC* e o *Hi-Blow FC-8040*. O primeiro é um soprador rotativo de duplo estágio, capaz de gerar uma vazão de ar máxima de quase 80 NI/min, com uma diferença de pressão entre entrada e saída superior a 400 mbar, como demonstrado nos dados experimentais do gráfico de Figura 7.

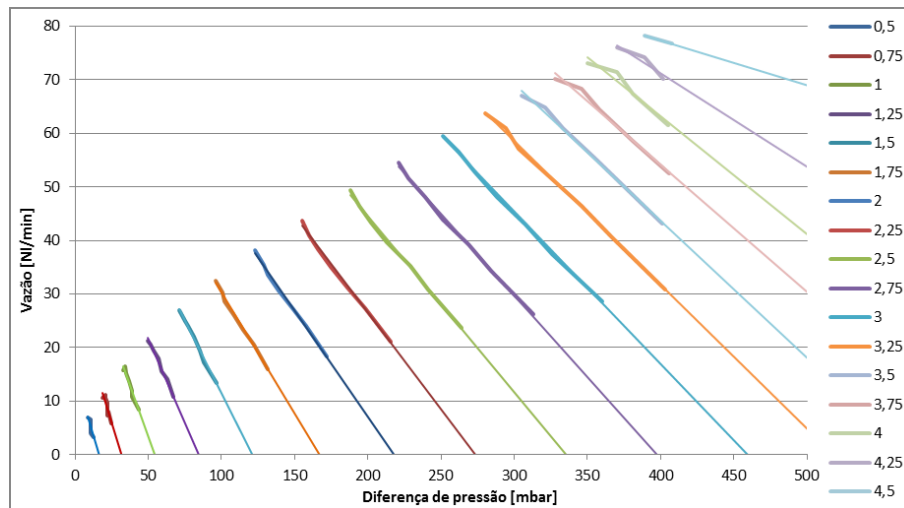


Figura 7: Característica vazão/pressão do soprador *Vairex VBR2-2 48VCC* para diferentes valores do sinal de controle, cujos valores estão indicados na legenda interna da figura em Volts. As linhas finas representam a tendência linear que pode ser deduzida dos dados experimentais.

O modelo da *Hi-Blow* é um soprador alternativo a membrana, caracterizado por uma vazão máxima de aproximadamente 30 NI/min com uma diferença de pressão entre entrada e saída em torno de 365 mbar. A Figura 8 mostra a característica vazão/pressão do soprador.

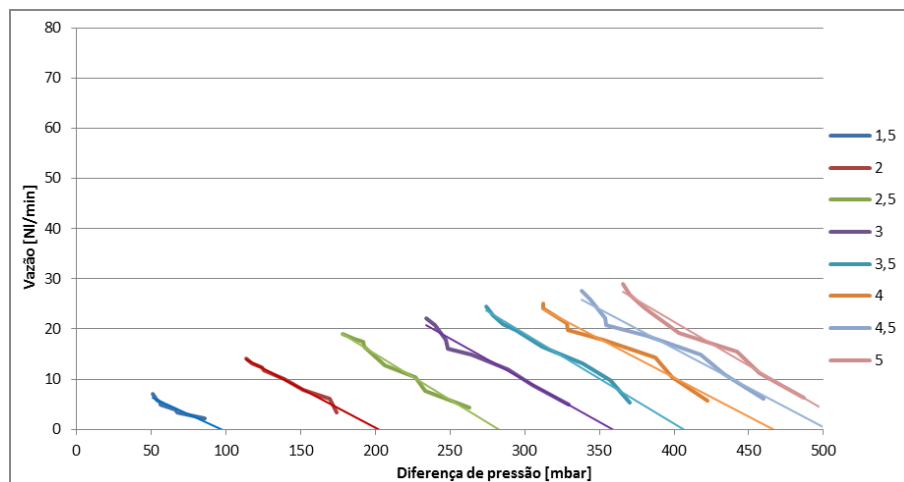


Figura 8: Característica vazão/pressão do soprador *Hi-Blow FC8040* para diferentes valores do sinal de controle, cujos valores estão indicados na legenda interna da figura em Volts. As linhas finas representam a tendência linear que pode ser deduzida dos dados experimentais.

O gráfico da Figura 9 mostra a potência elétrica consumida com a variação da vazão gerada pelos sopradores. São reportadas as curvas medidas no teste do modelo da *Vairex* para diferentes sinais de controle. No caso do soprador *Hi-Blow*, o consumo de potência elétrica foi aproximadamente constante com a variação da diferença de pressão, dependendo principalmente da velocidade do acionamento do soprador; consequentemente, foi possível incluir no gráfico uma curva única, obtida como interpolação dos valores de potência medidos com diferentes valores de sinal de controle.

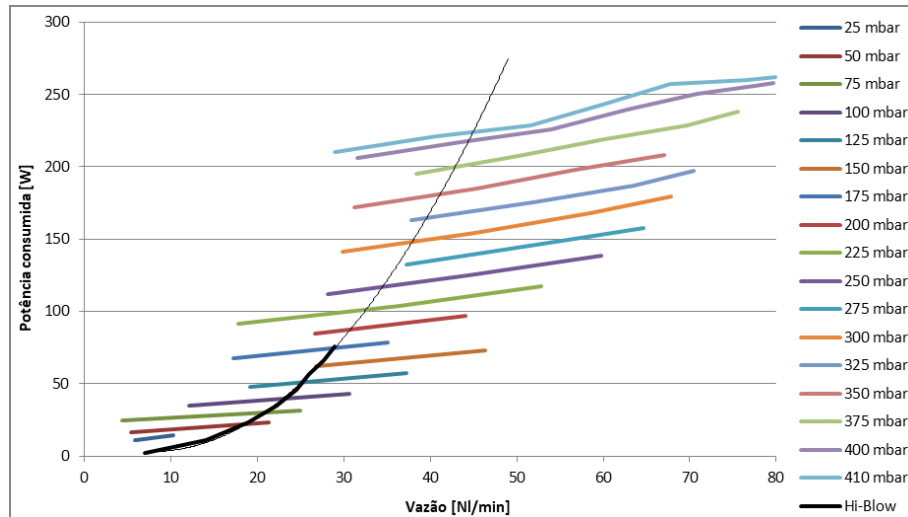


Figura 9: Característica potência/vazão dos dois modelos de soprador para diferentes valores do sinal de controle, cujos valores estão indicados na legenda interna da figura em Volts. A linha fina ascendente representa a tendência que pode ser deduzida dos dados experimentais obtidos para o modelo *Hi-Blow*.

3.2 Trocadores de calor

Os trocadores de calor projetados são do tipo casco/tubo, em configuração contracorrente (ou seja, com fluido frio e quente entrando de lados opostos do trocador). Os resultados do dimensionamento dos três trocadores de calor estão listados na Tabela 1. O dimensionamento foi efetuado considerando os trocadores em série: primeiro o pré-aquecedor do ar, depois o evaporador do etanol e, por fim, o evaporador de água. A tubulação escolhida para o lado do casco tem diâmetro de 12,7 mm e parede de 1,5 mm, enquanto para o lado do tubo tem diâmetro de 6,35 mm e parede de 1 mm.

Tabela 1: Resultados do dimensionamento dos trocadores de calor.

| VARIÁVEL | VALOR | | | | | | UNIDADE |
|-----------------------------|-------------|------|----------------------|--------|--------------------|------|-----------------|
| | TROCADOR AR | | EVAPORADOR DE ETANOL | | EVAPORADOR DE ÁGUA | | |
| Fluido | Exaustão | Ar | Exaustão | Etanol | Exaustão | Água | |
| Local | Casco | Tubo | Casco | Tubo | Casco | Tubo | |
| Vazão | 0,42 | 0,38 | 0,42 | 0,04 | 0,42 | 0,06 | g/s |
| Temperatura de entrada | 857 | 60 | 695 | 25 | 586 | 25 | °C |
| Temperatura de saída | 695 | 250 | 586 | 473 | 351 | 473 | °C |
| Perda de carga | 8 | 27 | 12 | 4 | 15 | 9 | mbar |
| Potência térmica | 76 | | 52 | | 112 | | W |
| Área de troca térmica | 21,8 | | 21,4 | | 96,8 | | cm ² |
| Comprimento total dos tubos | 10,9 | | 10,7 | | 48,5 | | cm |

3.3 Eletrônica de potência

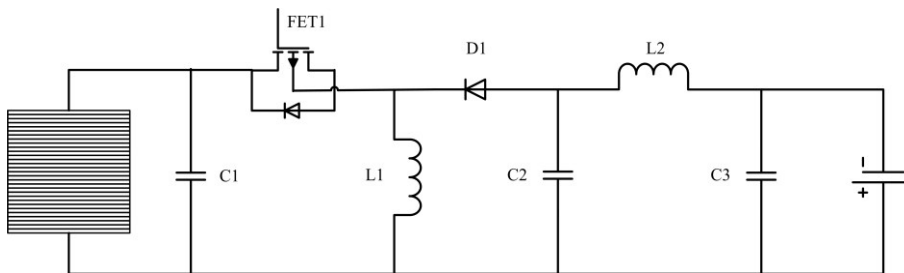
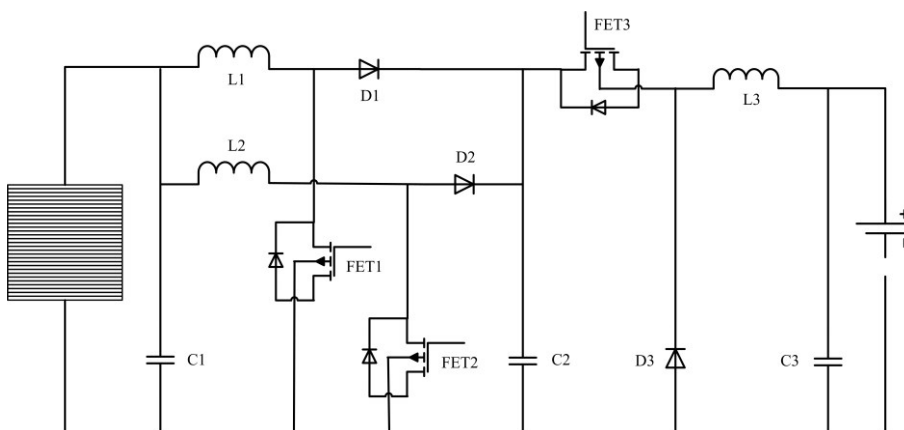
O modelo de inversor CC/CA escolhido foi o modelo *OutBack GFX1424*. Os testes em bancada permitiram verificar o funcionamento do mesmo em todo o intervalo de potência indicado nas especificações (0 - 1400 VA). A eficiência média obtida, igual a 91,6 %, também foi análoga àquela indicada nas especificações do equipamento (92 %).

Como mencionado na seção 2.3, foram selecionadas diferentes alternativas para a realização do conversor CC/CC. Os dados de projeto do conversor, listados na Tabela 2, foram fixados considerando na entrada um empilhamento de 30 pilhas e na saída um banco de baterias de tensão nominal 24 V_{CC}:

Tabela 2: Dados de projeto do conversor CC/CC.

| VARIÁVEL | SÍMBOLO | VALOR | UNIDADE |
|---|---------------------|-------|---------------|
| Potência de entrada e saída | $P_S - P_E$ | 750 | W |
| Frequência de chaveamento | f_{switch} | 50 | kHz |
| Tensão de saída máxima | $V_{S,\text{max}}$ | 28 | V |
| Tensão de saída mínima | $V_{S,\text{min}}$ | 19,5 | V |
| Tensão de entrada máxima | $V_{E,\text{max}}$ | 35 | V |
| Tensão de entrada mínima | $V_{E,\text{min}}$ | 15 | V |
| Oscilação de tensão máxima de entrada e saída | ΔV | 1 | V |
| Valor máximo de indutância | L_{max} | 20 | μH |

O valor de indutância foi limitado para viabilizar a construção do protótipo de conversor na prática (indutores de valor maior resultam em tamanho e peso excessivo). Considerando os dados da Tabela 2 e a literatura sobre o assunto [22-24], as possibilidades selecionadas para o estudo foram a topologia *buck-boost* (Figura 10) e um conversor com um estágio *boost interleaved* e um estágio *buck* conectados em série, indicado nesse texto como conversor *boost+buck* (Figura 11).

**Figura 10:** Esquema do conversor CC/CC *buck-boost*.**Figura 11:** Esquema do conversor CC/CC *boost+buck*.

O estágio *interleaved* é caracterizado pela presença de dois braços iguais em paralelo, cujas chaves nunca são acionadas ao mesmo tempo (cada uma fica aberta em toda a metade do ciclo de trabalho onde a outra pode estar fechada). Em teoria, isso reduz as oscilações de corrente e tensão suportadas pela pilha a combustível [25]. A Tabela 3 indica o dimensionamento teórico dos componentes dos dois conversores.

Tabela 3: Projeto dos conversores CC/CC *buck-boost* e *boost+buck*.

| VARIÁVEL | SÍMBOLO | BUCK-BOOST | BOOST+BUCK | UNIDADE |
|----------------------------------|---|-----------------|----------------|---------------|
| Indutâncias | $L_1 - L_2 - L_3$ | 20 – 13 | 20 – 13 – 13 | μH |
| Corrente máxima nas indutâncias | $I_{\max,L1} - I_{\max,L2} - I_{\max,L3}$ | 100 – 50 | 31 – 31 – 44 | A |
| Tensão máxima nas indutâncias | $V_{\max,L1} - V_{\max,L2} - V_{\max,L3}$ | 63 – 63 | 35 – 35 – 28 | V |
| Corrente máxima nos diodos | $I_{\max,D1} - I_{\max,D2} - I_{\max,D3}$ | 100 | 25 – 25 – 22 | A |
| Tensão máxima nos diodos | $V_{\max,D1} - V_{\max,D2} - V_{\max,D3}$ | 63 | 28 – 28 – 35 | V |
| Capacitores (valores comerciais) | $C1 - C2 - C3$ | 470 – 470 – 470 | 270 – 270 – 22 | μF |
| Corrente máxima nos capacitores | $I_{\max,C1} - I_{\max,C2} - I_{\max,C3}$ | 100 – 100 – 100 | 31 – 31 – 44 | V |
| Tensão máxima nos capacitores | $V_{\max,C1} - V_{\max,C2} - V_{\max,C3}$ | 63 – 63 – 63 | 35 – 35 – 35 | A |

Para avaliar o desempenho dos conversores em termos de eficiência energética $\eta_{\text{CC/CC}}$ e das oscilações da corrente de entrada e saída, as duas topologias foram simuladas computacionalmente para diferentes valores do estado de carga das baterias (associados a diferentes níveis de tensão das mesmas) e uma potência produzida do empilhamento de 750 W. Os resultados da simulação estão listados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados da simulação em *Matlab-Simulink* dos conversores CC/CC *buck-boost* e *boost+buck*.

| VARIÁVEL | BUCK-BOOST | | | | | BOOST+BUCK | | | | | UNIDADE |
|---|------------|------|------|------|------|------------|------|------|-----|------|---------|
| | 1 | 25 | 50 | 75 | 99 | 1 | 25 | 50 | 75 | 99 | |
| Carga da bateria C_{batt} | 1 | 25 | 50 | 75 | 99 | 1 | 25 | 50 | 75 | 99 | % |
| Eficiência energética $\eta_{\text{CC/CC}}$ | 82,1 | 89,5 | 89,4 | 89,7 | 90,3 | 92,1 | 93,8 | 93,9 | 94 | 94,3 | % |
| Oscilação de corrente na entrada ΔI_E | 560 | 600 | 730 | 740 | 750 | 10 | 50 | 50 | 50 | 50 | mA |
| Oscilação de corrente na saída ΔI_S | 14 | 11 | 10 | 10 | 11 | 0,6 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | mA |

3.4 Testes de empilhamentos comerciais

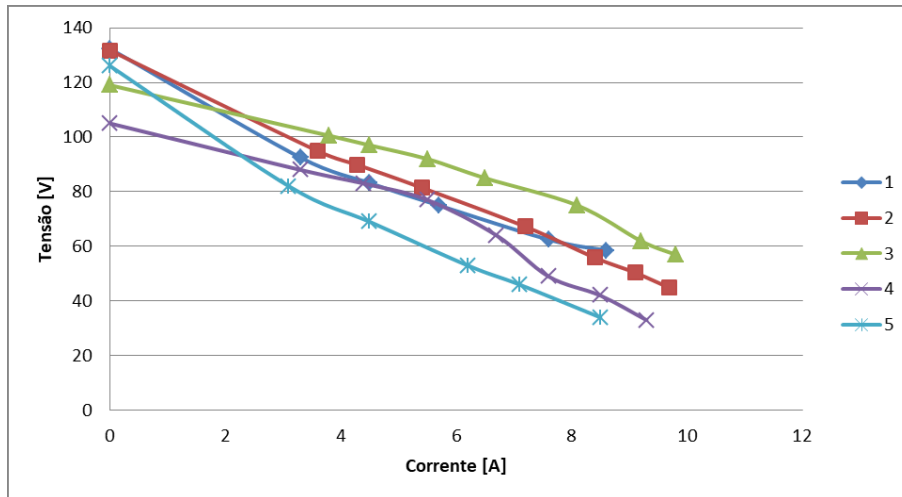
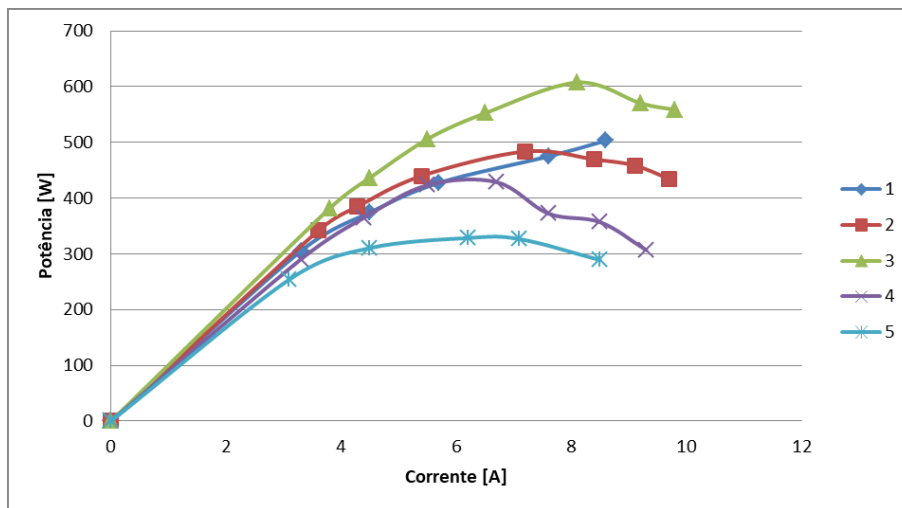
O primeiro sistema testado, produzido pela *Almus AG*, é formado por quatro empilhamentos conectados em série, cada um composto por 16 pilhas quadradas de 25 cm² de área. O sistema possui também aquecedores elétricos para elevar a sua temperatura até o nível de operação. Inicialmente, o empilhamento foi alimentado com hidrogênio e ar. A rotina de teste sugerida pelo fabricante, que participou dos testes, foi a seguinte:

1. o sistema foi aquecido até 600 °C, circulando nitrogênio (0,3 NI/min) no lado anódico. O procedimento de aquecimento durou aproximadamente 160 minutos;
2. o sistema foi mantido em 600 °C por 45 minutos, circulando H₂ (0,6 NI/min) no lado anódico;
3. foi enviado o fluxo de ar (8 NI/min);
4. foram medidas três curvas de polarização, iniciando a primeira em 600 °C, com um fluxo de H₂ de 12 NI/min e um fluxo de ar de 33,6 NI/min;
5. uma quarta curva foi medida com um fluxo de H₂ de 10 NI/min e um fluxo de ar de 28 NI/min;
6. uma quinta curva foi medida com um fluxo de H₂ de 12 NI/min e um fluxo de ar de 33,6 NI/min.

Os resultados principais estão resumidos na Tabela 5 e nos gráficos das Figuras 12 e 13. Na Tabela 5 estão indicadas a temperatura média mínima e a temperatura média máxima, registradas durante a medição de cada curva. As curvas foram medidas uma depois da outra, em sequência.

Tabela 5: Resultados dos testes do empilhamento *Almus AG*.

| CURVA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | UNIDADE |
|----------------------------|------|------|------|------|------|---------|
| Temperatura mínima | 605 | 692 | 757 | 851 | 655 | °C |
| Temperatura máxima | 653 | 709 | 780 | 876 | 685 | °C |
| Vazão de hidrogênio | 12 | 12 | 12 | 10 | 12 | NI/min |
| Vazão de ar | 33,6 | 33,6 | 33,6 | 28 | 33,6 | NI/min |
| Perda de pressão anodo | | 38,7 | | 33 | 33 | mbar |
| Perda de pressão catodo | | 194 | | 147 | 188 | mbar |
| Eficiência elétrica máxima | 23,3 | 22,4 | 28,1 | 23,8 | 18,2 | % |

**Figura 12:** Curvas de polarização medidas no funcionamento do empilhamento *Almus AG*.**Figura 13:** Curvas de potência medidas no funcionamento do empilhamento *Almus AG*.

Uma vez terminados os testes, o empilhamento foi desligado, reduzindo a temperatura até a temperatura ambiente, circulando no lado anódico uma vazão de nitrogênio de 0,3 NI/min para evitar a oxidação do anodo. Nas sessões de testes seguintes, o módulo apresentou uma rápida deterioração no funcionamento com hidrogênio, inviabilizando a obtenção de dados significativos sobre o funcionamento do mesmo com etanol como combustível. Para obter mais detalhes sobre as possíveis causas da degradação do sistema, uma vez concluídos os testes o mesmo foi desmontado. Um dos empilhamentos foi aberto e as pilhas analisadas. As pilhas na parte superior do empilhamento mostraram-se muito danificadas, quebradas, reduzidas em pedaços ou com eletrodos descolados do eletrólito. As pilhas da parte inferior do empilhamento, ao contrário, mostra-

ram-se relativamente íntegras, com apenas leves danos, provavelmente mesmo provocados pelo processo de desmontagem.

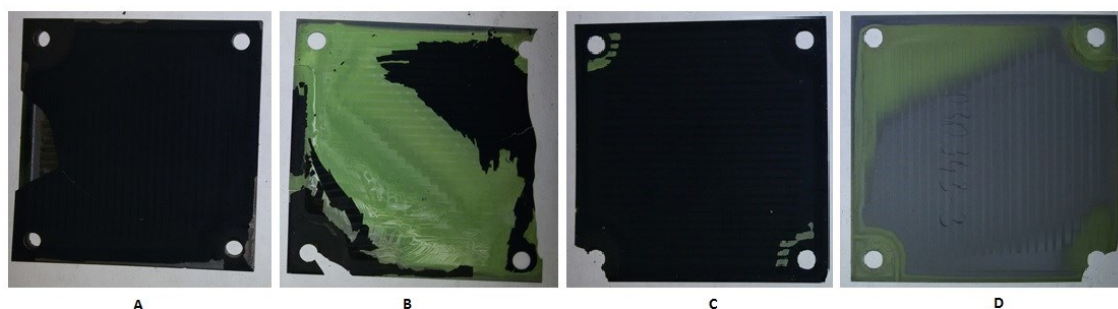


Figura 14: Pilhas a combustível desmontadas do empilhamento da *Almus AG*. As pilhas indicadas com as letras A e B foram desmontadas da parte superior do empilhamento; as pilhas indicadas com as letras C e D foram desmontadas da parte inferior do mesmo.

O segundo empilhamento que foi testado é o *SOFcMan NIMTE-A-Stack-301*, de fabricação chinesa. Uma vez montado na bancada de teste, foi seguido o procedimento de inicialização dos testes indicado no manual do dispositivo:

1. aquecimento do empilhamento a uma taxa de $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, alimentando uma vazão de nitrogênio de $2\text{ NI}/\text{min}$ no lado anódico;
2. substituição do nitrogênio com hidrogênio, com a mesma vazão;
3. depois de 10 minutos, começar a enviar ar no lado catódico, com uma vazão de $5\text{ l}/\text{min}$;
4. redução do empilhamento nessas condições durante 3 horas antes de começar os testes.

No começo da sessão de teste, foram aplicadas as vazões de ar e hidrogênio que permitiram obter a máxima potência elétrica. Feito isso, foram realizadas algumas tentativas de operação com uma mistura etanol/água no lugar do hidrogênio. Inicialmente, não foi possível alcançar um funcionamento estável do empilhamento nessa condição. Reduzindo a quantidade de água alimentada foi possível medir algumas curvas de polarização também utilizando etanol como combustível. Depois de cada período de funcionamento com etanol, o empilhamento foi realimentado com hidrogênio, efetuando medições para detectar a possível degradação do dispositivo. Os principais resultados dos testes são resumidos na Tabela 6 e nas Figuras 15 e 16.

Tabela 6: Resultados dos testes do empilhamento *SOFcMan NIMTE-A-STACK-301*.

| VARIÁVEL | H ₂ (1) | H ₂ (2) | C ₂ H ₆ O (1) | H ₂ (3) | C ₂ H ₆ O (2) | H ₂ (4) | UNIDADE |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------------|--------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------|
| Temperatura do empilhamento | 756 | 756 | 755 | 755 | 770 | 766 | $^{\circ}\text{C}$ |
| Temperatura de entrada ar | 33 | 36 | 36 | 36 | 33 | 35 | $^{\circ}\text{C}$ |
| Temperatura de entrada combustível | 336 | 325 | 446 | 325 | 502 | 350 | $^{\circ}\text{C}$ |
| Vazão hidrogênio | 9,5 | 9,5 | - | 9,5 | - | 9,5 | NI/min |
| Vazão etanol | - | - | 1,6 | - | 1,6 | - | ml/min |
| Vazão água | - | - | 2 | - | 2 | - | ml/min |
| Vazão ar | 25 | | | | | | NI/min |
| Perda de pressão lado anódico | 15 | 23 | 16 | 8 | 3 | 13 | mbar |
| Perda de pressão lado catódico | 12 | 8 | 8 | 8 | 12 | 12 | mbar |
| Eficiência elétrica | 34 | 30,8 | 36 | 24,8 | 25,6 | 23,8 | % |

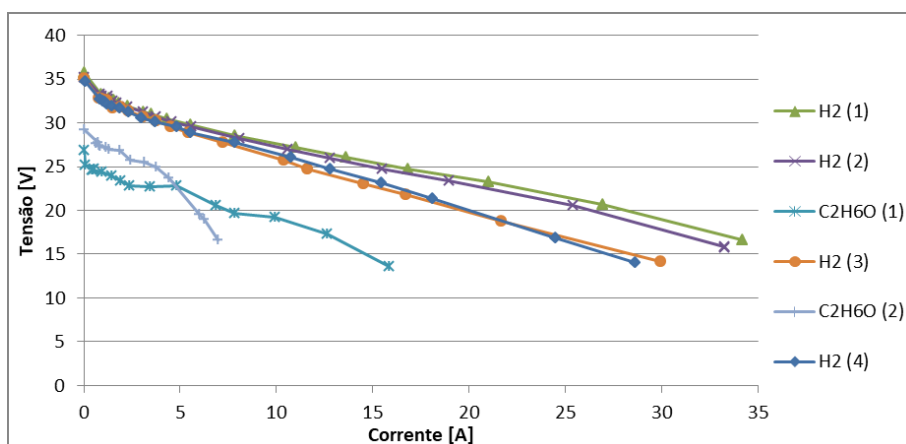


Figura 15: Curvas de polarização medidas durante funcionamento do empilhamento *NIMTE-A-Stack-301*.

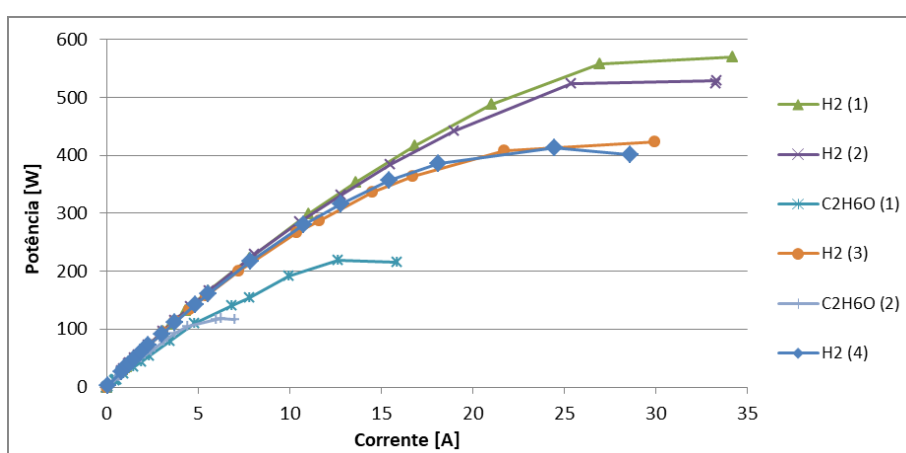


Figura 16: Curvas de potência medidas durante funcionamento do empilhamento *NIMTE-A-Stack-301*.

4. DISCUSSÃO

4.1 Bombas peristálticas e sopradores

A bomba peristáltica testada demonstrou um desempenho suficiente pela aplicação, sendo capaz de gerar uma vazão superior à requerida, que de acordo com a simulação do sistema [20] e com os dados obtidos sobre o funcionamento dos empilhamentos comerciais em nenhum caso supera os 10 ml/min. A potência consumida medida foi baixa e a precisão do controle adequada.

Os gráficos da seção 3.1 demonstram como ambos os sopradores mostraram-se adequados para a aplicação, sendo capazes de gerar a vazão requerida com um consumo de potência bastante reduzido. Na Figura 9 é possível ver que, no intervalo de vazão de projeto do sistema (20 - 30 NI/min), o consumo do modelo *Hi-Blow* é menor do que o consumo do modelo *Vairex* nos pontos de funcionamento caracterizados por uma alta diferença de pressão do circuito de teste. Isso é condizente com o fato de que a queda da vazão com o aumento da diferença de pressão é menos marcada no caso do modelo *Hi-Blow*, como é possível verificar comparando as características pressão/vazão dos dois dispositivos. Para diferenças de pressão mais baixas, é o *Vairex* que absorve uma potência elétrica menor. Um aspecto que favorece o modelo *FC8040* é o baixo nível de ruído durante a operação, muito menor que no caso do *VBR2-2 48VCC*. Todavia, sendo o soprador de ar o dispositivo individual do balanço de planta que consome a maior potência, a escolha entre os dois modelos será feita baseando-se principalmente no valor da potência elétrica absorvida. De fato, limitar o consumo de potência dos auxiliares é extremamente importante para obter uma boa eficiência elétrica global do sistema. Dado que no caso do soprador *Vairex* o consumo de potência depende fortemente da pressão que o soprador precisa garantir na saída, a escolha entre os modelos será efetuada depois de ter finalizado o circuito de alimentação do ar ao empilhamento e medida a perda de pressão do mesmo nas condições de operação.

4.2 Trocadores de calor

Baseando-se nos resultados do dimensionamento teórico, o projeto mecânico dos trocadores de calor está sendo finalizado. Uma vez produzidos, serão testados em bancada para verificar a adequação às condições operacionais reais do protótipo.

4.3 Eletrônica de potência

Como mencionado na seção 3.3, o conversor CC/CA selecionado mostrou-se adequado para a aplicação.

Como é possível ver nos esquemas das Figuras 10 e 11, o conversor CC/CC *boost+buck* requer mais componentes que o *buck-boost*, necessitando de mais duas chaves, dois diodos e um indutor. Por outro lado, os componentes usados no conversor *boost+buck* precisam sustentar correntes e tensões máximas de valor menor, como é possível verificar na Tabela 3. Consequentemente, pode-se esperar que o custo de produção das duas topologias não seja muito diferente, sendo a economia de componentes do *buck-boost* parcialmente compensada pelo custo maior dos componentes de maior tensão e corrente. No entanto, os resultados das simulações computacionais listados na Tabela 4 evidenciam como a opção *boost+buck* mostra-se superior à *buck-boost*, tanto do ponto de vista da eficiência energética, como do ponto de vista da redução das oscilações de corrente. Esse último aspecto resulta em concordância com as informações da literatura, sendo mencionado como uma das principais vantagens da topologia *interleaved* [24-25]. Ambos os fatores são de extrema importância no projeto do protótipo. De fato, a eficiência do conversor CC/CC tem uma forte influência sobre a eficiência total do sistema, dado que toda a energia elétrica produzida pelo empilhamento é convertida no dispositivo, sendo reduzida por conta das perdas no mesmo. Manter um baixo valor das oscilações de corrente na saída da PaCOS e na entrada das baterias é fundamental para garantir uma longa vida útil desses equipamentos, que representam as partes mais importantes e caras do protótipo. Em conclusão, a opção *buck+boost*, apesar de ser de construção mais complexa, é mais adequada para a aplicação e foi escolhida para a construção do conversor CC/CC.

4.4 Testes de empilhamentos comerciais

Durante a medição das primeiras três curvas de polarização com o empilhamento da *Almus AG*, o aumento da temperatura de teste resultou em um aumento do desempenho do módulo. O ponto melhor foi obtido durante a terceira medição, com um pico de potência de 607 W e uma eficiência elétrica do módulo de 28,1 %. Nos ensaios subsequentes não foi possível obter de novo resultados parecidos. Na medição da curva 4, Figura 13, o aumento adicional da temperatura não provocou um melhoramento do desempenho, que ao contrário piorou, devido provavelmente à diminuição dos fluxos de combustível e oxidante. Quando o fluxo foi elevado novamente ao nível inicial (curva 5 da Figura 13) permaneceu todavia impossível alcançar resultados no mesmo nível daqueles obtidos nos primeiros três ensaios. De fato, nessa última medição a potência máxima não superou 328 W, amplamente abaixo do valor obtido na primeira curva (503 W), que foi registrada em condições de temperatura parecidas. A potência produzida pelo empilhamento diminuiu constantemente nos ensaios seguintes, em alguns casos de forma dramática, não alcançando novamente esse desempenho. Isso sugeriu a possibilidade de um problema interno dos empilhamentos e inviabilizou a possibilidade de testar o sistema com etanol como combustível. Danos resultantes da ciclagem térmica do sistema parecem ser a causa mais provável para a degradação do desempenho do sistema. Essa explicação é também coerente com a diferença observada entre o estado das pilhas desmontadas de posições diferentes do empilhamento, como mostrado na Figura 14. As pilhas posicionadas na parte alta do empilhamento, mais quente, foram provavelmente submetidas a estresses térmicos de maior magnitude, resultando de fato mais danificadas.

Um primeiro aspecto interessante evidenciado nos testes do empilhamento *SOFCMan NIMTE-A-Stack-301* foi que a potência máxima do empilhamento mostrou-se muito menor no funcionamento com etanol do que com hidrogênio. Esse efeito era esperado, dado que o etanol não pode participar diretamente das reações eletroquímicas no anodo comercial, que envolvem exclusivamente hidrogênio e monóxido de carbono. O desempenho eletroquímico das pilhas depende então essencialmente da disponibilidade de H₂ e CO, como evidenciado na literatura [16]. Esses gases são produzidos a partir da combinação do etanol com o vapor d'água, na reação de reforma a vapor:



A reação (5) ocorre com boa velocidade nos níveis de temperatura dos empilhamentos PaCOS e os anodos comerciais baseados em níquel são bons catalisadores para a reforma a vapor. Todavia, o fato que parte da área útil das pilhas seja empregada para catalisar a reação (5) leva a uma redução da área ativa dis-

ponível para a produção de corrente, com consequente queda da densidade de potência do empilhamento no funcionamento com etanol. Além disso, a conversão do etanol resulta provavelmente incompleta, levando a uma diminuição do combustível disponível para produção de corrente elétrica. Foram também observadas instabilidades no nível de potência produzida, possivelmente relacionada a dificuldades na passagem do combustível nos compartimentos anódicos (projetados para fluxo de hidrogênio), com consequentes oscilações de vazão. Outro ponto importante é que o nível de potência máxima decaiu rapidamente no decorrer dos testes. Um fator de degradação pode ter sido a operação com etanol: a reação (5) é endotérmica e quando acontece no empilhamento pode criar estresses térmicos e danificar as pilhas. Além disso, é possível que o fluxo de água empregado possa não ter sido suficiente para prevenir completamente a formação de carbono a partir do etanol, o que pode acontecer na alta temperatura do anodo das PaCOS. Essa eventualidade é amplamente relatada na literatura [16- 19] e resulta um dos problemas principais que dificulta o uso de etanol em PaCOS. Por outro lado, a queda da potência máxima manifestou-se também na operação com H₂ e não foi possível observar uma clara relação entre esse efeito e o tempo de operação com etanol. Um aspecto positivo da operação com etanol foi o nível de eficiência elétrica, que mostrou-se mais alta que em testes efetuados com hidrogênio, imediatamente antes ou depois. Os dados obtidos evidenciaram então que a operação do empilhamento *SOFCSMan NIMTE-A-Stack-301* com etanol como combustível em regime de reforma interna é viável, mas leva a uma marcada queda de potência, a instabilidades no funcionamento e, provavelmente, a uma mais rápida degradação do sistema.

5. CONCLUSÕES

Um modelo de bomba, um de inversor e dois de soprador de ar foram testados com êxito, mostrando-se adequados para a aplicação analisada. A escolha do modelo de soprador será feita dependendo das características de perda de pressão da linha do ar do protótipo completo. Os trocadores de calor foram dimensionados e encontram-se em fase de produção. A topologia do conversor CC/CC foi escolhida através de simulações computacionais, e o componente está sendo fabricado. Os testes de bancada dos empilhamentos comerciais confirmaram o funcionamento adequado da bancada de teste e confirmaram que a operação desses dispositivos em regime de reforma interna do etanol, apesar de ser possível, acarreta relevantes problemas como redução da potência máxima e instabilidade no funcionamento. As atividades dessa linha de trabalho continuarão com o desenvolvimento de um empilhamento específico para a utilização direta de etanol como combustível, de desempenho melhor e mais estável, utilizando o anodo proprietário desenvolvido pelo Laboratório de Hidrogênio. Em paralelo, o empilhamento comercial que deu os melhores resultados, o *SOFCSMan NIMTE-A-Stack-301*, será utilizado para auxiliar no projeto e na construção do balanço de planta definitivo do protótipo.

6. AGRADECIMENTOS

A pesquisa objeto desse artigo foi desenvolvida com apoios financeiros do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) através do contrato número 11.2.0323.1.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] BAGOTSKY, V.S., SKUNDIN, A.M., VOLFKOVICH, Y.M., *Electrochemical Power Sources*, Hoboken, Wiley, 2015.
- [2] CORALLI, A., D'AVIGNON, A., FREITAS, M.A.V., "Micro cogeração distribuída com emprego de pilhas a combustível de óxido sólido no Brasil", In: *Anais do XV Congresso Brasileiro de Energia*, Rio de Janeiro, Out. 2013.
- [3] *Balanço Energético Nacional 2016*, Rio de Janeiro, Empresa de Pesquisa Energética, 2016.
- [4] TORRES, S.O.A., MESQUITA FILHO, A.C., MIRANDA, P.E.V., "Control Strategy for Balance of Plant in Solid Oxide Fuel Cell", *IEEE Latin America Transactions*, v. 11, n. 2, March 2013.
- [5] MIRANDA, P.E.V., VENÂNCIO, S.A., MIRANDA, H.V., U.S. Patent 9,431,663 B2, August 2016.
- [6] ARTEAGA-PEREZ, L.E., CASAS, Y., PERALTA, L.M., *et al.*, "An auto-sustainable solid oxide fuel cell system fueled by bio-ethanol Process simulation and heat exchanger network synthesis", *Chemical Engineering Journal*, v. 150, pp. 242-251, 2009.
- [7] HONG, W.-T., YEN, T.-H., CHUNG, T.-D., *et al.*, "Efficiency analyses of ethanol-fueled solid oxide fuel cell power system", *Applied Energy*, v. 88, pp. 3990-3998, 2011.

- [8] SAEBEA, D., PATCHARAVORACHOT, Y., ARPORNWICHANOP, A., “Analysis of an ethanol-fuelled solid oxide fuel cell system using partial anode exhaust gas recirculation”, *Journal of Power Sources*, v. 208, pp. 120-130, 2012.
- [9] CASAS LEDÓN, Y., ARTEAGA-PEREZ, L.E., TOLEDO, J., *et al.*, “Exergoeconomic evaluation of an ethanol-fueled solid oxide fuel cell power plant”, *Energy*, v. 93, pp. 1287-1295, 2015.
- [10] TIPPAWAN, P., ARPORNWICHANOP, A., DINCER, I., “Energy and exergy analyses of an ethanol-fueled solid oxide fuel cell for a trigeneration system Thermodynamic analysis of solid oxide fuel cell system using different ethanol reforming processes”, *Energy*, v. 87, pp. 228-239, 2015.
- [11] THANOMJIT, C., PATCHARAVORACHOT, Y., PONPESH, P., *et al.*, “Thermodynamic analysis of solid oxide fuel cell system using different ethanol reforming processes”, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 40, pp. 6950-6958, 2015.
- [12] VENÂNCIO, S.A., DE MIRANDA, P.E.V., “Solid oxide fuel cell anode for the direct utilization of ethanol as a fuel”, *Scripta Materialia*, v. 65, n. 12, pp. 1065-1068, 2011.
- [13] NOBREGA, S.D., GALESKO, M.V., GIRONA, K., *et al.*, “Direct ethanol solid oxide fuel cell operating in gradual internal reforming”, *Journal of Power Sources*, v. 213, pp. 156-159, 2012.
- [14] AUGUSTO, B.L., NORONHA, F.B., FONSECA, F.C., *et al.*, “Nickel/gadolinium-doped ceria anode for direct ethanol solid oxide fuel cell”, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 39, pp. 11196-11209, 2014.
- [15] STEIL, M.C., NOBREGA, S.D., GEORGES, S., *et al.*, “Durable direct ethanol anode-supported solid oxide fuel cell”, *Applied Energy*, v. 199, pp. 180-186, 2017.
- [16] DIETHELM, S., VAN HERLE, J., “Ethanol internal steam reforming in intermediate temperature solid oxide fuel cell”, *Journal of Power Sources*, v. 196, pp. 7355-7362, 2011.
- [17] POMFRET, M.B., STEINHURST, D.A., OWRUTSKY, J.C., “Ni/YSZ solid oxide fuel cell anodes operating on humidified ethanol fuel feeds: An optical study”, *Journal of Power Sources*, v. 233, pp. 331-340, 2013.
- [18] MORALES, M., ESPIELL, F., SEGARRA, M., “Improvement of performance in low temperature solid oxide fuel cells operated on ethanol and air mixtures using Cu-ZnO-Al₂O₃ catalyst layer”, *Journal of Power Sources*, v. 293, pp. 366-372, 2015.
- [19] SILVA, A.A.A., BION, N., EPRON, F., *et al.*, “Effect of the type of ceria dopant on the performance of Ni/CeO₂ SOFC anode for ethanol internal reforming”, *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 206, pp. 626-641, 2017.
- [20] CORALLI, A., DE MIRANDA, H.V., MONTEIRO, C.F.E., *et al.*, “Mathematical model for the analysis of structure and optimal operational parameters of a solid oxide fuel cell generator”, *Journal of Power Sources*, v. 269, pp. 632-644, 2014.
- [21] MOHAN, N., UNDELAND, T.M., ROBBINS, W.P., *Power Electronics - Converters, Applications, and Design*, 3 ed., Wiley, 2002.
- [22] ZHANG, Z., PITTINI, R., ANDERSEN, M.A.E., *et al.*, “A review and design of power electronics converters for fuel cell hybrid system applications”, *Energy Procedia*, v. 20, pp. 301-310, 2012.
- [23] KIRUBAKARAN, A., SHAIENDRA JAIN, NEMA, R.K., “A review on fuel cell technologies and power electronic interface”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, pp. 2430-2440, 2009.
- [24] KOLLI, A., GAILLARD, A., BERNARDINIS, A., *et al.*, “A review on DC/DC converter architectures for power fuel cell applications”, *Energy Conversion and Management*, v. 105, pp. 716-730, 2015.
- [25] KAZIMIERCZUK, M.K. *Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters*, 2 ed., Chichester, Wiley, 2016.