

Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido de 50 W

Cláudio Homero Ferreira da Silva, Alaíse Junia Vieira Madureira, André Martins Carvalho, Rosana Zacarias Domingues

Resumo – Os sistemas de energia cada vez mais estão se direcionando para fontes renováveis e usos com baixa emissões e eficientes, por opções tecnológicas ou por pressão da sociedade. Dentro desse direcionamento as tecnologias associadas com o hidrogênio merecem destaque por atender a vários requisitos desejáveis para os sistemas energéticos. As células a combustível são equipamento onde é gerada a energia elétrica usando hidrogênio. O tipo de célula SOFC, constituído de material cerâmico e que opera a alta temperatura se mostra promissor para sistemas de geração distribuída. Este artigo apresenta o desenvolvimento do P&D Cemig/Aneel 097 (Código Aneel 0049-043/2003), que trata do desenvolvimento de um protótipo de célula tipo SOFC de 50 W. São apresentadas as atividades e procedimentos desenvolvidos, bem como as dificuldades e principais resultados obtidos.

Palavras-chave – Célula a combustível, hidrogênio, SOFC.

I. INTRODUÇÃO

Acompanhando o balanço energético nacional [1] percebe-se um aumento crescente na demanda de energia. Este aumento possui intensa relação com a atividade econômica, e muito mais que bens e serviços produzidos pela energia, pode também indicar a popularização tecnológica, atingindo cada vez a um público maior e neste caso, gerando um melhoria na qualidade de vida da população.

O desafio de suprir a demanda futura com energia renovável, ambientalmente correta, economicamente viável, socialmente aceitável tem se mostrado de difícil solução. São muitas as restrições impostas pelos processos ou pela sociedade, reduzindo significativamente o universo para obtenção de uma solução satisfatória.

Uma das maneiras mais modernas e utilizadas no mundo para conter a expansão do consumo sem comprometer a qualidade de vida e o desenvolvimento econômico tem sido o uso eficiente [2]. A eficiência energética tem se mostrado de grande importância, a fim de se evitar demanda pela atualização tecnológica do processo, por ações educativas, investimento em equipamentos e instalações afim de minimização as perdas nos processos. Neste caso, sistemas energeticamente eficientes representam uma oportunidade de reflexão

sobre o aquecimento global e escassez de combustíveis [3].

Os sistemas de geração distribuída (GD) se caracterizam principalmente pela geração próxima ao local de consumo. As tecnologias de GD vêm se tornando cada vez mais presentes no setor elétrico mundial, com importantes tendências, como por exemplo, as redes inteligentes, chamadas de *smartgrid*. Dentre as principais tecnologias aplicáveis à geração distribuída de energia destacam-se: as células a combustível, as microturbinas a gás, os motores de combustão interna de baixa emissão, os motores Stirling e os painéis fotovoltaicos, pequenas centrais hidrelétricas, as termelétricas solares, as eólicas e a co-geração. Pelo fato de serem tecnologias de produção de energia local, é esperada uma redução de custo, uma vez que não é necessária grande infraestrutura de transmissão e distribuição e são reduzidas as perdas por transporte.

As redes inteligentes são apoiadas nas tecnologias de geração local e de geração distribuídas, bem como agrega filosofias de operação associadas com a rede mundial de computadores e nos conceitos de inteligência artificial de forma a agregar serviços ao sistema elétrico, possibilitando ao consumidor melhores condições de gerenciamento e uso eficiente de energia. Nesse cenário futuro as células a combustível, principalmente as do tipo óxido sólido, que trabalham em alta temperatura e possibilitam a co-geração se mostram bastante atraentes, principalmente considerando-se os benefícios esperados.

A Cemig vem investindo em projetos de utilização de fontes de energia renováveis, com destaque para biomassa, pequenas centrais hidrelétricas, energia solar e geração eólio-elétrica e adicionalmente, tem investido em projetos de uso racional da energia, co-geração e geração distribuída [4]. Atenta às oportunidades que podem advir da tecnologia das células a combustível a empresa desenvolve desde 2000, projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) podendo-se citar: a produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e por reforma de etanol, o protótipo de célula a combustível do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*) e do tipo SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*).

As células a combustível são equipamentos onde ocorre uma reação eletroquímica entre o hidrogênio, que pode ser puro ou em mistura gasosa, e o oxigênio, resultando em energia elétrica, calor e vapor de água como produtos. As SOFC possuem como particularidades principais a composição baseada em materiais cerâmicos e a operação em alta temperatura (700-1000° C). Essa condição de temperatura abre a possibilidade para a reforma interna, ou seja, o hidrogênio é gerado de outros combustíveis e desta forma não

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL.

C. H. F da. Silva, A. J. V. Madureira e A. M. Carvalho trabalham na Cemig GT SA. (e-mails: chomero@cemig.com.br; alaise.madureira@cemig.com.br e amartins@cemig.com.br).

R. D. Zacarias trabalha na UFMG (email: rosanazd@ufmg.br)

necessita ser produzido, eliminando importantes gargalos tecnológicos e econômicos associados com a produção e armazenamento de gás hidrogênio. Outra vantagem deste sistema é a possibilidade de geração de calor simultaneamente com energia em sistemas de co-geração ou mesmo tri-geração, caso o sistema de exaustão da célula seja acoplado a um *chiller* de absorção, por exemplo. Estes projetos têm sido pesquisados pela Cemig dentro do P&D 237 - Avaliação teórico-experimental da gaseificação de biomassa para o acionamento de células a combustível de óxido sólido [5].

As SOFC representam uma nova opção de suprimento descentralizado de energia elétrica alinhadas com a visão de futuro da Cemig e do setor elétrico [6].

A seção II apresenta de forma breve o projeto de desenvolvimento de um protótipo de SOFC. A seção III mostra o laboratório de materiais e pilhas a combustível (LaMPaC), importante instalação onde foi desenvolvido de forma pioneira no Brasil o empilhamento de células unitárias deste tipo de célula a combustível. Na seção IV encontram-se os resultados e principais discussões decorrentes da execução desta pesquisa. As conclusões do trabalho encontram-se na seção V e no encerramento do trabalho estão as referências bibliográficas para a elaboração deste artigo.

II. P&D CEMIG/ANEEL Nº 097 (CÓDIGO ANEEL 0049-043/2003)

A. SOFC: descrição básica

A Figura 1 ilustra o funcionamento de uma SOFC, inclusive indicando as reações que ocorrem no sistema. Do lado catódico, o comburente é reduzido e do lado anódico o combustível é oxidado.

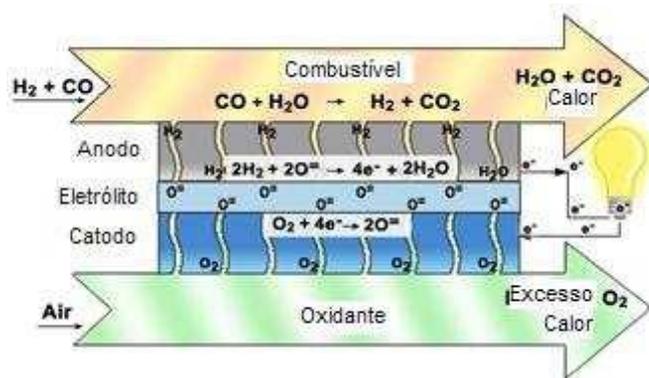


Figura 1 – LaMPaC na UFMG.

O rendimento dessa reação não é 100%, uma parte da entalpia livre da reação é liberada na forma de calor, permitindo, no caso das células de alta temperatura, como é o caso da SOFC, manter a temperatura de funcionamento da célula. A diferença de potencial (ddp) que existe entre os eletrodos da célula em funcionamento é devida aos elétrons fornecidos pelo anodo e os elétrons consumidos no catodo. A ddp teórica entre um eletrodo de oxigênio e um eletrodo de hidrogênio é de 1,23 V em circuito aberto a 298 K, no entanto, em circuito fechado este potencial diminui devido aos efeitos

relacionados com a cinética das reações eletroquímicas e às perdas de natureza ôhmica. [7]

A composição mais adequada para o eletrólito é a zircônia estabilizada com ítria (YSZ) na proporção $ZrO_2 \cdot 0,92$ $Y_2O_3 \cdot 0,08$. Tal material trata-se de um condutor puramente iônico numa faixa ampla de pressão parcial do oxigênio e por apresentar coeficiente térmico de dilatação mais próxima aos componentes adjacentes. Para o anodo, o material mais utilizado é um composto formado a partir de óxido de níquel (NiO) com o material usado no eletrólito. Já no caso do catodo, são usados eletrodo composto por manganitas de lantânio dopadas com estrôncio (LSM). Encerando os principais componentes das células encontram-se as placas bipolares, responsáveis pela condução eletrônica, que devem ser química, morfológica e mecanicamente estáveis nas condições de oxidação e de redução. A utilização de interconectores na forma metálica ou de ligas pode diminuir o custo de produção, se tornando um fator relevante para a viabilidade econômica destes equipamentos. Os materiais mais utilizados são: aços inoxidáveis (ferríticos e austeníticos), ligas a base de níquel da série Inconel® e Crofer 22 – APU.

Este tipo de célula a combustível não usa metais nobres, a exemplo a célula tipo PEM que usa platina ou ligas com esse metal, devido o trabalho em alta temperatura, preferencialmente acima de 700° C. Tal condição leva a uma redução de custo da matéria-prima por um lado e a um aumento de custo associado com a condição de trabalho. A eficiência deste sistema é elevada, atingindo a ordem de 60% [8], uma vez que as condições de operação possibilitam a produção de calor, que pode ser usado para a co-geração ou aplicações em ciclo combinado. A Figura 2 mostra uma configuração para essa aplicação.

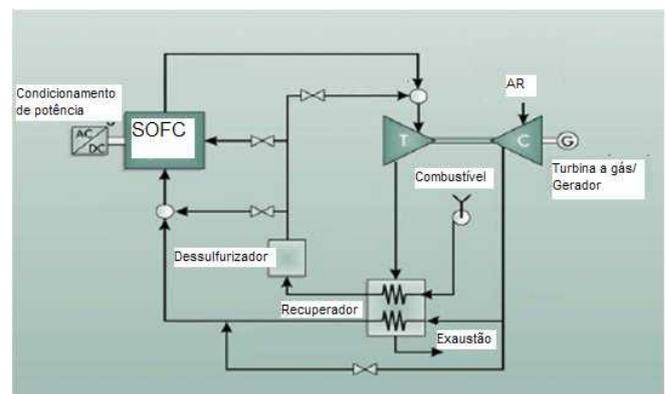


Figura 2 – Esquema simplificado de co-geração com SOFC.

Além disso, as SOFC são relativamente inertes e estáveis frente ao manuseio e corrosividade dos materiais, possuem emissões extremamente baixas e o perigo de eliminação de CO no gás de exaustão é eliminado uma vez que todo CO produzido é convertido em CO_2 nas altas temperaturas de operação. Tais equipamentos têm uma expectativa de vida acima de 40000 h-80000 h. Entretanto trata-se de uma tecnologia com dificuldades operacionais devido a problemas como o da estanqueidade aos gases.

Dentre as empresas e instituições que pesquisaram ou ainda desenvolvem esta tecnologia, pode-se citar: Westinghouse, NEDO (*New Energy Development Organization*), Honeywell, Siemens e a Fuji Electric, Ceramic Fuel Cells Limited, Ztek, Sulzer Hexis, ECN (*Energyszerzoek Centrum Nederland*), Rolls-Royce, CEA (*Commissariat à l'Énergie Atomique*), ECN e DLR (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*, Alemanha), universidade de Keele (Reino Unido), pelo centro de Jülich (Alemanha) e pelos laboratórios franceses LEPMI (*Laboratoire d'Electrochimie et Physicochimie des Matériaux et des Interfaces*), LACE (*Laboratoire de l'Application de la Chimie à l'Environnement*), LCM (Laboratoire de Chimie Inorganique de Toulouse) e ICMB (*Institut de Chimie et de la Matière condensée de Bordeaux*).

Pode-se afirmar que as SOFC de tecnologia planar estão em estágio de desenvolvimento mais ou menos avançado em todo o mundo, pois mesmo os produtos que começam a entrar no mercado tratam-se de protótipos refinados e não de produtos comerciais. Uma grande expectativa comercial foi o anúncio da empresa Siemens de uma unidade de 250 kW para 2009.

No Brasil existem trabalhos isolados de pesquisa e desenvolvimento em diferentes estágios tecnológicos. Dentre os trabalhos realizados merecem destaque os realizados: na UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais) na área de produção e caracterização de eletrólitos e catodos, de medidas elétricas e eletroquímicas dos mesmos e de suas interfaces; na UNESP (Universidade do Estado de São Paulo) na produção de catodos e ensaios elétricos de célula unitária e no IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) na produção de eletrólito. Este ano foi lançado o Programa Brasileiro de Células a Combustível. Este programa pretende criar condições para o desenvolvimento de uma tecnologia nacional em sistemas energéticos baseados em pilhas a combustível e para o estabelecimento de uma indústria nacional para produção destes sistemas, além de incentivar a instalação dos mesmos. Investimentos deste programa no desenvolvimento das SOFC de tecnologia planar estão previstos no âmbito da Rede de Células a Combustível e Eletroquímica.

B. O Projeto

No Brasil são limitadas e mesmo inexistentes a experiência na produção, instalação e operação de pilhas a combustível de altas temperaturas, principalmente no que se refere às tecnologias de pilhas a base de óxidos sólidos. Mais raros ainda são os grupos de pesquisa que possuem trabalho de desenvolvimento neste tipo de tecnologia. As SOFC são os mais eficientes (quantidade de combustível consumida / quantidade de energia gerada) geradores de eletricidade do tipo pilha a combustível em desenvolvimento no mundo, permitindo um uso flexível de combustíveis como os alcanos leves, o hidrogênio e principalmente o gás natural. A tecnologia das SOFC é muito adequada para aplicações no mercado de geração estacionária de potência, porque a sua elevada eficiência de conversão fornece grandes benefícios quando o custo do combustível é elevado devido às dificul-

dades de entrega. São construídas em módulos e inteiramente em estado sólido, podendo ser elaboradas para atender demandas de potência específicas as necessidades. São, também, suficientemente silenciosas para instalação em casas.

A tecnologia envolvida no desenvolvimento de células de alta temperatura é bastante complexa e demanda trabalhos interdisciplinares (várias áreas da engenharia e das ciências básicas, como a química e a física). Esta diversidade indica ao mesmo tempo as dificuldades e os significativos ganhos científicos e tecnológicos que um projeto neste tema possa trazer. Este projeto prevê o desenvolvimento dos processos de sínteses e processamentos cerâmicos de materiais visando a montagem, operação e otimização de células unitárias de óxido sólido que culminará na elaboração de um protótipo operacional estacionário de 50 W. Este se trata um marco na nacionalização e desenvolvimento de tecnologia em pilhas a combustível de alta temperatura.

O P&D CEMIG/ANEEL 097 (Código Aneel 0049-043/2003) se iniciou no ciclo 2002/2003, com previsão de duração de 48 meses e foi encerrado em Junho/2009. Resultou da parceria entre a Cemig Distribuição SA e o Departamento de Química da Universidade Federal de Minas Gerais (DQ/UFMG). Seus principais objetivos foram [9]:

- Desenvolver tecnologia nacional de produção de sistemas modulares de células a combustível de óxidos sólidos (do tipo SOFC), sendo proposta como meta final produzir um protótipo de 50 W;
- Como objetivos específicos a serem atingidos no desenvolvimento deste projeto de pesquisa pode-se citar:
- Desenvolver tecnologia nacional para síntese, conformação e sinterização de sistemas cerâmicos destinados a elaboração das células unitárias;
 - Projetar e desenvolver placas bipolares para distribuição de gases e interconexão das células unitárias;
 - Desenvolver tecnologia nacional para pré-aquecimento e partida das células e do protótipo de SOFC;
 - Implementar os sistemas de segurança para trabalho com as células unitárias e com o protótipo de SOFC;
 - Desenvolver sistemas periféricos de testes elétricos do protótipo de SOFC, visando a avaliação do desempenho e otimização do mesmo;
 - Testar e caracterizar as meia-células, as células unitárias e o protótipo de SOFC;
 - Montar um protótipo de pilha a combustível do tipo SOFC de 50 W;

C. Metodologia

A metodologia executada para se atingir o objetivo do projeto é apresentada a seguir:

- Ampla revisão bibliográfica sobre o assunto de células a combustível do tipo SOFC [8];
- Formação da equipe e planejamento da pesquisa [10];
- Adequação do laboratório para a pesquisa;
- Projeto de construção do DHCEL – Dispositivo Hospedeiro da Célula;
- Projeto e construção do LaMPaC;
- Elaboração e montagem de célula unitária com eletrólito

espesso;

- Preparação de materiais compósitos de anodo e de catodo para uso efetivo em meia-células [11];
- Preparação e caracterização de materiais compósitos de anodo (NiO/YSZ) e de materiais de catodo (LSM-YSZ) para célula unitária de alta temperatura usando o eletrólito denso [12];
- Caracterização de meia-células com eletrólito espesso, usando o potenciostato [13];
- Especificação de equipamentos para o LaMPaC [14];
- Célula unitária de eletrólito espesso preparada sobre uma pastilha de zircônia estabilizada com ítria (YSZ) no tamanho para uso no DHCEL [15];
- Estudos reológicos das barbotinas de anodo e caracterização dos filmes obtidos por aerografia [16],[17];
- Estudos das placas bipolares utilizando diferentes ligas metálicas;
- Atualização bibliográfica;
- Projetos construtivos do protótipo P50W, dos sistemas de controle térmico, de testes e de gases [18];
- Desenvolvimento e caracterização de pó, barbotina e filme de anodo suporte obtido por moldagem em fitas (*tape casting*) [19];
- Detalhamento no sistema de testes do protótipo;
- Projeto e execução de um dispositivo de testes de vedação dos selantes e aquisição de placas bipolares;
- Desenvolvimento e caracterização de filmes cerâmicos para as meias-células com eletrólitos finos;
- Projeto execução e testes do Protótipo PA (preparação para o protótipo final P50W) [20];
- Aprimoramento do processo do filme de anodo suporte obtido por moldagem em fita;
- Modificação na suspensão e processamento e caracterização do filme de catodo [21];
- Testes de vedação dos selantes;
- Construção e execução e testes do Protótipo PB (preparação para o protótipo final P50W) [22];
- Construção e execução e testes do Protótipo PC (preparação para o protótipo final P50W) [23];
- Execução e testes do Protótipo P50W [24];

D. Benefícios do projeto

Este projeto proporcionou a geração e difusão de conhecimento; formação e capacitação de profissionais para lidar com a tecnologia, inclusive com competências para direcionar estrategicamente o assunto; buscou-se desenvolvimentos que resultem em transferência tecnológica para a indústria e recebimento de royalties além de alavancar a tecnologia nacional com aumento da oferta de empregos, redução da dependência de tecnologia importada e na geração de patentes. A SOFC visa também o aumento da segurança e eficiência energética. Este desenvolvimento proporcionou uma oportunidade de consolidar a interação entre a Cemig/UFMG no desenvolvimento científico e tecnológico nacional

O LaMPaC (DQ/UFMG) se firmou como um centro de excelência no desenvolvimento de materiais e montagem de protótipos de pilhas a combustível de óxido sólido. Sendo

pioneiro no Brasil na montagem de protótipos contendo mais de uma célula unitária e até o momento único a utilizar tecnologia nacional em todas as etapas do processo que vai desde a síntese dos materiais por via química até a montagem do protótipo, mesmo para os interconectores e peças acessórias, usadas na montagem dos protótipos. O LaMPaC através da realização deste projeto encontra-se capacitado para o serviços de consultoria em toda a cadeia de produção de um protótipo de célula a combustível do tipo SOFC, desde o composto químico, passando pelos processos de suspensão, montagens de meia-célula de anodo, catodo e filme fino de eletrólito, até a geração de células unitárias e testes diversos de caracterização na mesma e construção e testes em protótipos de células empilhados.

Além disso, houve a participação em diversos fóruns científicos e tecnológicos em âmbito nacional e internacional. Foram defendidas 5 dissertações de mestrado e 2 teses de doutorado, além de publicação de 7 artigos em revista e 42 artigos em anais de congressos e seminários, sendo 34 desses apresentados nos eventos.

E. Principais dificuldades [11]-[24]

As principais dificuldades associadas com este projeto foram:

- A preparação do material cerâmico constituintes da SOFC exigem um processamento químico bastante extenso, trabalhoso, bastante sujeito a interferências de natureza química, de processo e manuseio;
- Necessidade de diversas adaptações decorrentes dos estudos e do processo de simulação e projeto;
- Dificuldades inerentes ao trabalho com hidrogênio e a alta temperatura;
- Difícil processo de homogeneização da temperatura dos gases, quando de operação da célula; Problemas de homogeneização e sinterização no compósito LSM-YSZ; Dificuldades de homogeneização de pintura com tinta LSM sobre pastilhas de YSZ;
- Defeitos e falhas em equipamentos essenciais para a síntese da meia-células, agravado pela dificuldade de assistência técnica;
- Atraso de obras de construção do laboratório, entrega de equipamentos e serviços;
- Vazamentos e dificuldade de selamento dos gases;
- Estrutura elétrica do laboratório inadequada para o funcionamento simultâneo de vários fornos, o que acarretou um baixo rendimento do processo de fabricação das células unitárias;
- Dificuldades de estabilidade do material quando submetido ao aquecimento necessário para sinterização e operação da célula. A Figura 3 mostra diversas unidades descartadas por empenamento ou trinca durante o processo de síntese.



Figura 3 – Eletrodos danificados no processo de síntese.



Figura 4 – LaMPaC na UFMG.

III. LABORATÓRIO DE MATERIAIS E PILHA A COMBUSTÍVEL

O LaMPaC foi construído no campus da Universidade Federal de Minas Gerais anexo ao departamento de química. O laboratório possui uma área instalada de aproximadamente 70 m² construída em 2 pavimentos, sendo composto das salas: de reunião, laboratório de reações, sala do protótipo e refrigeração. As Figuras xx-xx mostra a estrutura necessária para o desenvolvimento do protótipo de SOFC de 50W.

A sala do protótipo foi construída com pé direito duplo, com instalações elétrica anti-explosão, sensores de presença de hidrogênio, além de procedimentos operativos de segurança a fim de se executar o trabalho de desenvolvimento do protótipo lidando com o gás hidrogênio em plena segurança. A casa de gases foi instalada fora da edificação e teve as tubulações instaladas atendendo as normas de segurança do corpo de bombeiros. Os materiais constitutivos da instalação foram escolhidos de forma a se minimizar a propagação de fogo.

O LaMPaC foi equipado com os seguintes equipamentos principais e essenciais ao desenvolvimento do protótipo:

- contador laser;
- *tape casting*;
- *screen printing*;
- forno de sinterização de 1700 °C;
- Forno para a célula unitária;
- Forno para o protótipo;
- Potenciostato;
- Sistema de controle de gases;
- Sistema de testes do protótipo;
- Sistema de térmico do protótipo;
- Reômetro;
- Medidor de tamanho de partículas (potencial Zeta);



Figura 5 – Sala de reunião.



Figura 6 – Laboratório de reações.



(a)



(b)

Figura 7 – Sala do protótipo: a) sala b) unidade de testes do protótipo.



Figura 8 – Sala de refrigeração.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao longo deste projeto vários procedimentos para fabricação das pilhas unitárias a combustível de óxido sólido foram experimentados. Estes procedimentos envolveram, dentre outros, rotas de síntese de pós, fabricação de suspensões cerâmicas, processos de deposição de filmes e trata-

mentos térmicos [24].

Na rota utilizada para a produção de zircônia estabilizada com ítria (YSZ), os reagentes usados foram: oxicloreto de zircônio octahidratado ($ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$) (98 %), óxido de ítrio e ácido nítrico. Os pós de YSZ foram caracterizados Método Brunauer, Emmett e Teller (BET), difração de raios X Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), este último ensaio é ilustrado pela Figura 9.

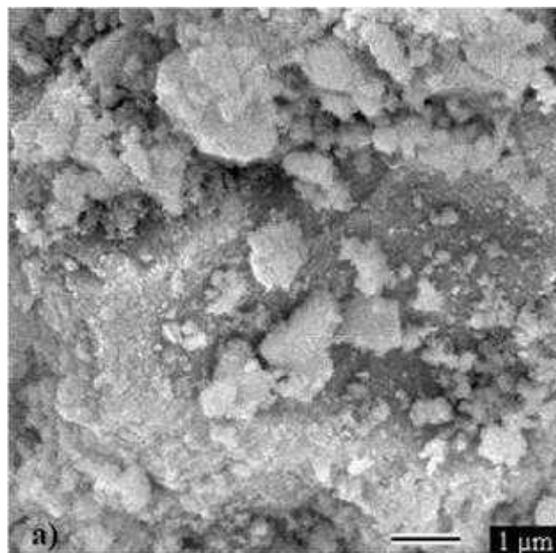


Figura 9: Micrografia do pó de YSZ [24].

As suspensões de eletrólito foram preparadas utilizando-se: YSZ, óleo de peixe, polietilenoglicol, álcool polivinílico, Etilenoglicol e foram caracterizadas segundo os métodos de análise térmica, estudo reológico e medidas de potencial zeta. A deposição do filme de eletrólito foi feita sobre um filme de anodo de formato arredondado com aproximadamente 17 mm de diâmetro e 1mm de espessura e em seguida houve tratamento térmico em forno. Os filmes de eletrólito foram então caracterizados usando microscopia ótica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

O pó de $La_{0,8}Sr_{0,2}MnO_3$ (LSM) que melhor se adequou à síntese dos filmes de catodo foi o pó obtido pela rota citrato. A caracterização foi realizada utilizando Difração de raios X (DRX), BET, MEV. As suspensões de LSM citrato e suspensão do compósito formado por zirconia estabilizada com ítria (YSZ) e LSM citrato foram preparadas e caracterizadas usando análise térmica e estudo reológico.

Os filmes de catodo foram obtidos utilizando serigrafia e pintura com pincel. A caracterização do filme de anodo foi realizada através de: MEV, microscopia ótica, espectroscopia de impedância.

Na síntese do anodo, este foi depositado pelo método de moldagem em fitas para obtenção do anodo suporte e por aerografia para obtenção do anodo funcional. A caracterização neste caso foi feita análise térmica, difração de raios X e BET.

A célula unitária para medida de impedância foi preparada utilizando o anodo suporte depositado por moldagem em fitas. Sobre o anodo foi depositado o eletrólito com pincel e sobre o eletrólito, foi depositado o catodo. Foi realizado o

tratamento térmico para calcinação e sinterização do filme entre as deposições. As medidas de impedância na célula unitária foram realizadas conforme descrito acima para as medidas no anodo funcional. Na Figura 10 encontra-se a montagem para testes na célula unitária. A Figura 11 apresenta o resultado das medidas de densidade de potência da célula.

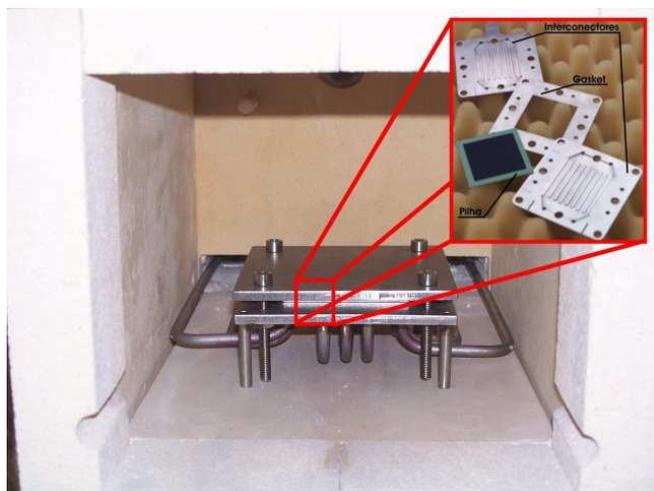


Figura 10 – Estrutura dos testes da célula unitária.

O protótipo final foi feito empilhando-se 3 pilhas unitárias de óxido sólido com eletrólito fino. A área útil das pilhas utilizadas é de 4 cm² e a geométrica de 5 cm². O procedimento de montagem do Protótipo envolve várias etapas feitas a 4 ou 6 mãos. Ele exige concentração e dura cerca de 12 horas. A Figura 12 mostra o protótipo final pronto para os ensaios.

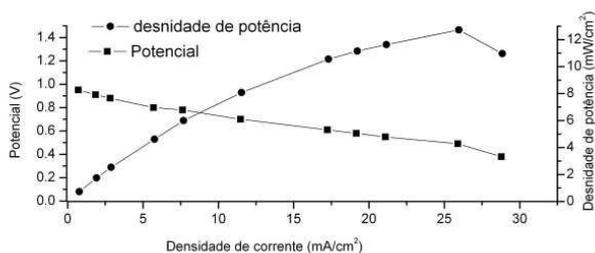


Figura 11: Densidade máxima de potência da célula unitária [24].



Figura 12: Stack montado para o teste final [24].

Após a montagem foi feito o procedimento de redução do anodo que visa reduzir o composto cerâmico NiO/YSZ, transformando-o no material de anodo Ni/YSZ. Na temperatura de 900 °C o potencial de circuito aberto da pilha estabilizou-se em torno de 1,9 V. Os ensaios de cronopotenciometria galvanostática permitiram avaliar o desempenho da pilha a 900 °C e com fluxo de 500 mL/min. de ar e 500 mL/min. de H₂ por pilha unitária. A potência obtida foi de 1,3 W.

Os resultados desta pesquisa podem ser sumarizados conforme a Tabela I:

Tabela I. Resultados do Projeto de P&D 097 (Código Aneel 0049-043/2003).

<i>Produtos</i>	<i>Estagio antes do Projeto</i>	<i>Patentável/comercializável</i>
Pós – anodo	NE	Não/Sim
Pós – eletrólito	E	Não/Sim
Pós – catodo	NE	Não/Sim
Susp. Anodo	NE	Sim/Sim
Susp. Eletrólito	NE	Sim/Sim
Susp. Catodo	NE	Sim/Sim
Filmes anodo	NE	Sim/Sim
Cél. Unitária	NE	Não/Sim
Protótipo	NE	Sim/Sim
Placas bipolares	NE	Sim/Sim

Legenda: Susp.: suspensão; Cél.: célula; NE: não existente; E: existente

V. CONCLUSÕES

Este projeto possibilitou a criação do LaMPaC no DQ/UFG e o desenvolvimento da pesquisa de construção de um protótipo de SOFC de 50 W. Foram formados 2 doutores e 5 mestres e constituída um equipe que publicou 7 artigos em periódicos e 42 artigos em congressos, tendo participado e apresentados os resultados em diversos fóruns científicos. A expectativa de sucesso deste projeto foi proporcional às dificuldades encontradas. Muitas das dificuldades, inerentes ao processo de pesquisa dificultaram sobremaneira a obtenção de resultados mais expressivos. De maneira geral, como exemplos de fatores externos, pode-se citar: atrasos de natureza diversa, dificuldades de se encon-

trar fornecedores. As dificuldades associadas a pesquisa com hidrogênio, materiais cerâmicos e altas temperaturas, tiveram a sua maior barreira dada pela dificuldade de homogeneidade nos processos e estanqueidade na operação das células unitárias. Foram desenvolvidos com sucesso procedimentos próprios para a fabricação de parte fundamentais da SOFC e protocolos experimentais para caracterização e testes, que direcionam inclusive para oportunidades comerciais e de patenteamento. A parte química e estrutural da célula unitária encontra-se em estágio dominado, apesar de carecer de melhoramentos. Foram construídos e testados diversos protótipo de células unitárias, cujos resultados indicaram modificações necessárias para os futuros experimentos. O protótipo P50W foi construído e testado obtendo a densidade máxima de potência na ordem de 12 mW/cm², com um potencial de circuito aberto estabilizado em 1,9 V à 900 ° C e com uma potência máxima de 1,3 W. Certamente este valor é muito abaixo da proposta, entretanto ainda sim pela natureza e complexidade da pesquisa trata-se de um grande avanço em se tratado de resultados do empilhamento de 3 células unitárias de SOFC. Os estudos e testes de vedação e interconexão se mostraram como condições críticas e onde os desenvolvimentos dever ser realizados primeiramente.

As tecnologias do hidrogênio são uma realidade com grandes dificuldades a serem enfrentadas em projetos de maior dimensão, envolvendo ainda equipes multidisciplinares. Entretanto se mostram ainda como uma importante opção para um futuro de médio/longo prazo na constituição do conjunto de soluções para a questão energética mundial.

A Cemig teve com este projeto a oportunidade de conhecer toda a cadeia de produção da SOFC ou PaCOS, aprendendo com o estado da arte, avaliando oportunidades de negócios, fomentando e estimulando a pesquisa e o desenvolvimento de recursos humanos. A expectativa no desenvolvimento de uma unidade comercial ainda se mantém, pois a proposta de projetos nas tecnologias do hidrogênio encontra-se bastante alinhada com o senso de responsabilidade ambiental e social, na produção de energia limpa e de forma renovável e no uso mais eficiente. As dificuldades deste projeto refletem as dificuldades encontradas em âmbito mundial. Desta forma o projeto P&D 097 (Código Aneel 0049-043/2003) se encerra, mas um novo será iniciado, o P&D 291, que trata da construção de um protótipo de SOFC de 1 kW. Realmente trata-se de um projeto audacioso mas que precisar ser feito para dar continuar os desenvolvimentos já realizados, buscando resolver agora os gargalos de engenharia de produto.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à equipe de pesquisa do Departamento de Química da Universidade Federal de Minas Gerais, e a toda a equipe do LaMPaC liderado pelos Professores Doutores Rosana Domingues Zacarias, Tulio Matencio e Márcia Caldeira Brant pela contribuição na elaboração deste documento.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Empresa de Pesquisa Energética” Balanço Energético Nacional 2009 – Ano base 2008: Resultados Preliminares”, Rio de Janeiro, EPE, 2009.
- [2] Aneel, “Atlas de energia elétrica do Brasil”, Aneel, Brasília, 2008.
- [3] Efficientia, “Relatório Efficientia 2007”, Efficientia, Belo Horizonte, 2008.
- [4] CEMIG, " Relatório de Sustentabilidade 2008" , Cemig., Belo Horizonte, Abril, 2009.
- [5] E. E. S. Lora, V. A. Medeiros, “D237 - Avaliação teórico-experimental da gaseificação de biomassa para o acionamento de células a combustível de óxido sólido (SOFC)”, Projeto de P&D D237, 2006.
- [6] Cemig, “Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico nº 5”, Cemig, Belo Horizonte, 2009.
- [7] R. D. Zacarias, T. Matencio, M. C. Brant “Relatório nº 1 – P&D 097”, Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2004.
- [8] M. M. Mench, “Fuel Cell Engines”, John Wiley & Sons Inc., Canada, 2008.
- [9] R. D. Zacarias, J. H. Diniz “Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido de 50 W”, Projeto de P&D Cemig/Aneel nº 097, Belo Horizonte, 2002.
- [10] R. D. Zacarias, T. Matencio, M. C. Brant “Relatório nº 2 – P&D 097”, Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2004.
- [11] R. D. Zacarias, T. Matencio, M. C. Brant “Relatório nº 3 – P&D 097”, Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2005.
- [12] R. D. Zacarias, T. Matencio, M. C. Brant “Relatório nº 4 – P&D 097”, Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2005.
- [13] R. D. Zacarias, T. Matencio, M. C. Brant “Relatório nº 5 – P&D 097”, Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2005.
- [14] R. D. Zacarias, T. Matencio, M. C. Brant “Relatório nº 6 – P&D 097”, Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2005.
- [15] R. D. Zacarias, T. Matencio, M. C. Brant “Relatório nº 7 – P&D 097”, Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2006.
- [16] R. D. Zacarias, T. Matencio, M. C. Brant “Relatório nº 8 – P&D 097”, Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2006.
- [17] R. D. Zacarias, T. Matencio, M. C. Brant “Relatório nº 9 – P&D 097”, Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2006.
- [18] R. D. Zacarias, T. Matencio, M. C. Brant “Relatório nº 10 – P&D 097”, Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2006.
- [19] R. D. Zacarias, T. Matencio, M. C. Brant “Relatório nº 11 – P&D 097”, Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2007.
- [20] R. D. Zacarias, T. Matencio, M. C. Brant “Relatório nº 12 – P&D 097”, Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2008.
- [21] R. D. Zacarias, T. Matencio, M. C. Brant “Relatório nº 13 – P&D 097”, Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2008.
- [22] R. D. Zacarias, T. Matencio, M. C. Brant “Relatório nº 14 – P&D 097”, Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2009.
- [23] R. D. Zacarias, T. Matencio, M. C. Brant “Relatório nº 15 – P&D 097”, Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2009.
- [24] R. D. Zacarias, T. Matencio, M. C. Brant “Relatório nº 16 – P&D 097”, Relatório de Projeto, Belo Horizonte, 2009.