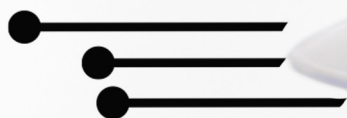




**Luís Fernando Paulista Cotian**  
**(Organizador)**

# **Engenharias, Ciência e Tecnologia 3** .....



**Luís Fernando Paulista Cotian**  
(Organizador)

# **Engenharias, Ciência e Tecnologia**

## **3**

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Lorena Prestes

Revisão: Os autores

#### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E57 Engenharias, ciência e tecnologia 3 [recurso eletrônico] / Organizador  
Luís Fernando Paulista Cotian. – Ponta Grossa (PR): Atena  
Editora, 2019. – (Engenharias, Ciência e Tecnologia; v. 3)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia.

ISBN 978-85-7247-086-5

DOI 10.22533/at.ed.865193101

1. Ciência. 2. Engenharia. 3. Inovações tecnológicas.  
4. Tecnologia. I. Cotian, Luís Fernando Paulista. II. Série.

CDD 658.5

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

A obra “Engenharia, Ciência e Tecnologia” aborda uma série de livros de publicação da Atena Editora. O volume III apresenta, em seus 11 capítulos, conhecimentos relacionados a Gestão Energética relacionadas à engenharia de produção nas áreas de Gestão de Recursos Naturais e Produção mais Limpa e Ecoeficiência.

A área temática de Gestão Energética trata de temas relevantes para a geração, manutenção e gerenciamento de assuntos relacionados à energia elétrica. As análises e aplicações de novos estudos proporciona que estudantes utilizem conhecimentos tanto teóricos quanto tácitos na área acadêmica ou no desempenho da função em alguma empresa.

Para atender os requisitos do mercado as organizações precisam levar em consideração a área de Gestão Energética, sejam eles do mercado ou do próprio ambiente interno, tornando-a mais competitiva e seguindo a legislação vigente.

Aos autores dos capítulos, ficam registrados os agradecimentos do Organizador e da Atena Editora, pela dedicação e empenho sem limites que tornaram realidade esta obra, que retrata os recentes avanços científicos do tema.

Por fim, espero que esta obra venha a corroborar no desenvolvimento de novos conhecimentos de Gestão Energética e auxilie os estudantes e pesquisadores na imersão em novas reflexões acerca dos tópicos relevantes na área de engenharia de produção.

Boa leitura!

Luís Fernando Paulista Cotian

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE ALTA CONCENTRAÇÃO NO NORDESTE BRASILEIRO	
<i>Hugo Tavares Vieira Gouveia</i>	
<i>Luiz Fernando Almeida Fontenele</i>	
<i>Rodrigo Guido Araújo</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8651931011</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>19</b>
CONFLITO ENTRE ENERGIA ASSEGURADA E HIDROGRAMA AMBIENTAL: O RIO SÃO FRANCISCO ESTÁ MORRENDO?	
<i>Paulo Roberto Ferreira de Moura Bastos</i>	
<i>Mônica Silveira</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8651931012</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>35</b>
DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA AUTOMATIZADO DE MONITORAÇÃO CONTÍNUA POR ANÁLISE DE IMAGEM DO ESTADO DE CHAVES DE CIRCUITOS ALIMENTADORES EM SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO	
<i>Lourival Lippmann Junior</i>	
<i>Bruno Marchesi</i>	
<i>Rafael Wagner</i>	
<i>Amanda Canestraro de Almeida</i>	
<i>Vanderlei Zarnicinski</i>	
<i>Bogdan Tomoyuki Nassu</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8651931013</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>54</b>
DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE PILHA A COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO COM POTÊNCIA DE GERAÇÃO DE 1 KW	
<i>Gabriel Leonardo Tacchi Nascimento</i>	
<i>Jacqueline Amanda Figueiredo dos Santos</i>	
<i>Rubens Moreira Almeida</i>	
<i>Tulio Matencio</i>	
<i>Rosana Zacarias Domingues</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8651931014</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>73</b>
EQUIPAMENTO COM RECONHECIMENTO DINÂMICO DE IMAGEM PARA AVALIAÇÃO DE MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA EM CAMPO	
<i>Fernanda Soares Giannini</i>	
<i>Ronaldo Borges Franco</i>	
<i>Joel Machado Campos Filho</i>	
<i>Ricardo Toshinori Yoshioka</i>	
<i>Jean Marcos Andery Baracat</i>	
<i>José Eduardo Bertuzzo</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8651931015</b>	

<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>87</b>
GERENCIAMENTO ENERGÉTICO PARA MICRORREDES: DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO PILOTO	
<i>Victor Maryama</i>	
<i>Vitor Seger Zeni</i>	
<i>Frederico Viveiros Jordan</i>	
<i>Cesare Quinteiro Pica</i>	
<i>Erlon Cristian Finardi</i>	
<i>Gabriel Aurélio de Oliveira</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8651931016</b>	
<b>CAPÍTULO 7 .....</b>	<b>107</b>
INJEÇÃO MÁXIMA DE MW POR GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM ALIMENTADOR PRIMÁRIO	
<i>Henrique Mesquita Tonhá</i>	
<i>Romário Pereira Marinho</i>	
<i>Antônio César Baleeiro Alves</i>	
<i>Luis Gustavo Wesz da Silva</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8651931017</b>	
<b>CAPÍTULO 8 .....</b>	<b>123</b>
SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO O ENERGYPLUS: UMA APLICAÇÃO VOLTADA AOS EDIFÍCIOS INTELIGENTES	
<i>Abraão Gualbeto Nazário</i>	
<i>Raimundo Celeste Ghizoni Teive</i>	
<i>João Zico Oliveira</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8651931018</b>	
<b>CAPÍTULO 9 .....</b>	<b>137</b>
VIBRATIONAL ENERGY HARVESTING TO ELECTRIC TRANSDUCTION IN A HIGH EFFICIENCY ELECTRIC VEHICLE	
<i>Jólio Ribeiro Maia Neto</i>	
<i>Ícaro Lofego Mota</i>	
<i>João Alexandrino Bemfica Neto</i>	
<i>Douglas da Costa Ferreira</i>	
<i>Fábio Roberto Chavarette</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8651931019</b>	
<b>CAPÍTULO 10 .....</b>	<b>141</b>
MAPEAMENTO DA GOVERNANÇA DO SETOR DE ENERGIA ELÉTRICA PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL	
<i>Tássia Fonseca Latorraca</i>	
<i>Raquel Naves Blumenschein</i>	
<i>Maria Vitória Ferrari</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.86519310110</b>	
<b>CAPÍTULO 11.....</b>	<b>157</b>
OTIMIZAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ENERGIA SOLAR COM O USO DE PLACAS FOTOVOLTAICAS E REFLETORES MÓVEIS	
<i>Cynthia Beatriz Scheffer Dutra</i>	
<i>Jean Paulo Rodrigues</i>	
<i>Paulo César Sedor</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.86519310111</b>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR .....</b>	<b>167</b>

## DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE PILHA A COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO COM POTÊNCIA DE GERAÇÃO DE 1 KW

### **Gabriel Leonardo Tacchi Nascimento**

CEFET-MG - Centro Federal de Educação  
Tecnológica de Minas Gerais  
Belo Horizonte - MG

### **Jacqueline Amanda Figueiredo dos Santos**

CEFET-MG - Centro Federal de Educação  
Tecnológica de Minas Gerais  
Belo Horizonte - MG

### **Rubens Moreira Almeida**

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais  
Belo Horizonte - MG

### **Tulio Matencio**

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais  
Belo Horizonte - MG

### **Rosana Zacarias Domingues**

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais  
Belo Horizonte - MG

**RESUMO:** A busca por sistemas de geração de energia mais eficientes e menos poluentes tem despertado grande interesse nas empresas geradoras de energia e na comunidade acadêmica. Nesse contexto, as pilhas a combustível de óxido sólido apresentam características que as colocam como uma das principais alternativas de geração limpa de energia. Essas pilhas, quando alimentadas por hidrogênio, têm rendimento superior a 70 % e liberam água como único produto da reação. Este artigo relata o desenvolvimento do projeto

em que foram construídos dois protótipos de pilhas a combustível de óxido sólido. Os resultados indicam a possibilidade de se alcançar 1 KW de potência. Este resultado é inédito no Brasil.

**PALAVRAS-CHAVE:** Célula a combustível de óxido sólido, energia renovável, hidrogênio, PaCOS, SOFC.

**ABSTRACT:** The search for more efficient and less polluting energy generation systems has aroused great interest in energy generating companies and in the academic community. In this context, solid oxide fuel cells have characteristics that make them one of the main alternatives for clean energy generation. These cells, when fed by hydrogen, have yields higher than 70% and release water as the only product of the reaction. This article reports the development of the project in which two prototypes of solid oxide fuel cells were built. The results indicate the possibility of reaching the power of 1 KW. This result is unprecedented in Brazil.

**KEYWORDS:** Solid oxide fuel cell, renewable energy, hydrogen, PaCOS, SOFC.

### 1 | INTRODUÇÃO

As pesquisas relacionadas a pilhas a combustível têm sido intensificadas devido ao

aumento da demanda de energia e à necessidade de produção de forma mais eficiente e com menor impacto ambiental. Esse tipo de tecnologia tem se destacado por ser um método muito eficiente de produção de energia, com mínima ou nenhuma emissão de poluentes tóxicos e de ruídos.

As pilhas a combustível são dispositivos que realizam a conversão da energia química contida em um combustível, usualmente o hidrogênio, diretamente em energia elétrica. Diferentes tipos de pilhas a combustível têm sido desenvolvidos, sendo os principais apresentados na Tabela 1.

<b>Tipo</b>	<b>Eletrólito</b>	<b>Temperatura de operação</b>
Pilha a Combustível de Membrana Polimérica	Polímero	40 – 80°C
Pilha a Combustível Alcalina	Hidróxido de potássio	65 – 220°C
Pilha a Combustível de Ácido Fosfórico	Ácido fosfórico	205°C
Pilha a Combustível de Carbonato Fundido	Carbonato Fundido	650°C
Pilha a Combustível de Óxido Sólido	Cerâmica	600 – 1000°C

Tabela 1 - Principais tipos de Pilhas a Combustível

As Pilhas a Combustível de Óxido Sólido (PaCOS), que operam a altas temperaturas, apresentam algumas vantagens frente aos demais tipos de pilhas, como: elevada eficiência na produção de eletricidade, facilidade de gerenciamento do eletrólito sólido e possibilidade de reforma do combustível (conversão em gás de síntese  $H_2$  e  $CO$ ) no próprio corpo da célula. Dessa forma, várias fontes de hidrogênio podem ser utilizadas pela pilha a combustível, tais como: gasolina, gás natural, óleo diesel, gás de síntese, metanol, etanol, biodiesel, etc. O rendimento elétrico dessa pilha pode chegar, teoricamente, a acima de 70%. Este valor é muito superior aos obtidos pelas máquinas térmicas cujos rendimentos não chegam a 30%. Além disso, esse gerador não emite ruído.

As PaCOS são constituídas, fundamentalmente, por células unitárias compostas por dois eletrodos porosos, catodo e anodo, separados por um eletrólito denso de elevada condução iônica. Para obter-se uma potência elevada, é necessário fazer o empilhamento («stack») de células unitárias, ligando-as em série ou em paralelo através de interconectores. A Figura 1 apresenta a configuração de uma célula a combustível e uma unidade de uma pilha «stack».



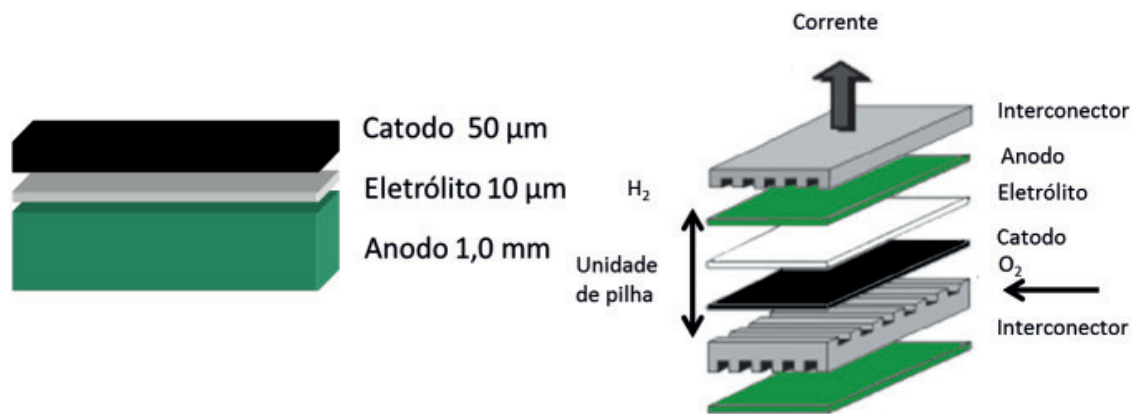


Figura 1 - Imagens ilustrativas de uma célula a combustível suportada pelo anodo (esquerda) e uma unidade básica de pilha (direita).

O objetivo principal do projeto foi o desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido com potência de geração de 1 KW. Além disso, o projeto visou, entre outros, o desenvolvimento da tecnologia nacional para síntese, conformação e sinterização de sistemas cerâmicos destinados à elaboração dos materiais de anodo, catodo e eletrólito que serão empregados nas células unitárias das PaCOS e a formação de mão-de-obra especializada para desenvolvimento e fabricação deste tipo de pilhas no Brasil.

Para alcançar tais objetivos, empregou-se uma metodologia de *scale-up* em que o estudo de otimização foi feito inicialmente em células botões com 20 mm de diâmetro e aplicado, posteriormente, em células de 80 mm utilizadas no protótipo. O projeto gerou como produtos principais dois protótipos e a partir destes resultados observar a possibilidade de construção de uma pilha combustível de 1 KW. Os trabalhos foram executados em conjunto com a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), cujo interesse principal é de diversificar a sua matriz energética.

## 2 | DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A fim de desenvolver o protótipo, o projeto foi dividido em três etapas. A primeira visou otimizar a elaboração dos componentes isolados (anodo, eletrólito e catodo) e das células unitárias. Estudos de meia-células permitiram avaliar o desempenho de cada componente antes da confecção da célula unitária. Na segunda etapa foram feitos testes eletroquímicos em células botões com diâmetro de 20 mm, em seguida, foram fabricadas células com diâmetro de 80 mm a partir dos parâmetros otimizados das células botões. Na terceira etapa foram montados e testados os dois protótipos com potências diferentes. O resumos das atividades desenvolvidas são observados na Figura 2, onde se mostra a ordem dessas dentro das três etapas do projeto.

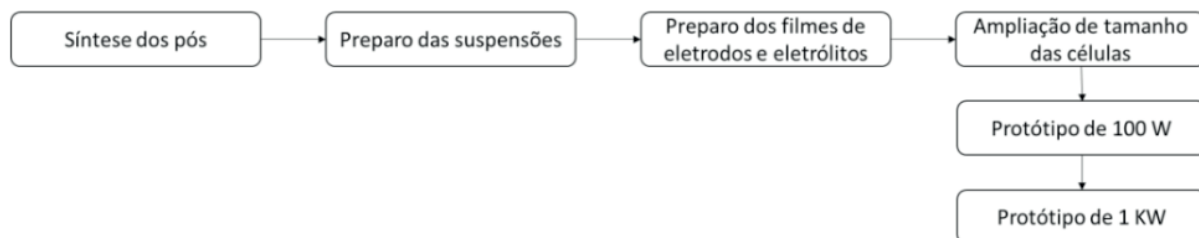


Figura 2 - Fluxograma das etapas do projeto.

## 2.1. Síntese dos pós

A maior parte dos pós utilizados na fabricação das células foram sintetizados no LaMPaC, a partir de precursores químicos comerciais. Com isso, o laboratório desenvolveu tecnologia própria para a síntese de pós cerâmicos. A Tabela 2 apresenta os constituintes químicos de cada um dos pós cerâmicos sintetizados, bem como, sua função na PaCOS.

Todos os pós sintetizados foram caracterizados por difração de raios X, espalhamento de luz dinâmico e isoterma de adsorção de gás nitrogênio.

Na difração de raios X foi utilizado um difratômetro de raios X da RIGAKU, modelo Geigerflex, radiação  $\text{CoK}\alpha$ , com tensão de 32,5 kV, corrente de 25 mA para o método de análise. Os resultados de difração foram analisados por comparação com os padrões de difração de Joint Committee of Powder Diffraction JCPDS.

Material	Abreviatura	Função
Céria dopada com gadolínio e zircônia dopada com ítria	CGO/YSZ	Precusores de eletrólito para PaCOs.
Óxido de níquel e óxido de zircônia dopada com ítria.	NiO/YSZ	Precusores de anodo para PaCOs.
Ferrita cobaltita de lantânio dopada com estrôncio	LSCF	Precusores de catodo para PaCOs.

Tabela 2 - Materiais cerâmicos desenvolvidos no projeto e sua função

A análise de Espalhamento de luz dinâmico baseou-se na suspensão do pó em etilenoglicol com auxílio de um ultrassom durante 5 minutos. Após esse tempo, cada suspensão permaneceu em repouso por 3 horas para sedimentação dos aglomerados. O sobrenadante foi então analisado em cubeta de vidro no aparelho Zetasizer 3000 (M/S Malvern Instruments Ltd, UK).

A análise de adsorção de gás nitrogênio foi realizada a 77K usando o analisador de adsorção Quantachrome Nova 2200. Antes das medidas de adsorção, as amostras foram desgaseificadas por 4 h a 393 K. Os dados foram tratados com o programa NovaWin V.10 1997–2007 Quantachrome Instruments Software (Boynton Beach, FL,

USA).

Através de tais análises foi possível determinar a estrutura cristalina, o tamanho médio das partículas e a área superficial de cada pó.

## 2.1 Preparo das suspensões de eletrólito e eletrodo

As suspensões de anodo, catodo e eletrólito são as precursoras dos filmes que compõem a célula a combustível. Elas foram preparadas a partir dos pós sintetizados, tendo sido caracterizadas por análise térmica e reologia.

A análise térmica visa o estudo do comportamento do material durante o processo de aquecimento, medindo a sua perda de massa em função da variação da temperatura. Essas informações são importantes na elaboração das rampas de temperatura do tratamento térmico dos filmes que serão fabricados. A Figura 3, mostra em caráter ilustrativo, uma análise térmica da suspensão de anodo de NiO/YSZ. Foi utilizado o aparelho da marca Shimadzu modelo DTG60.

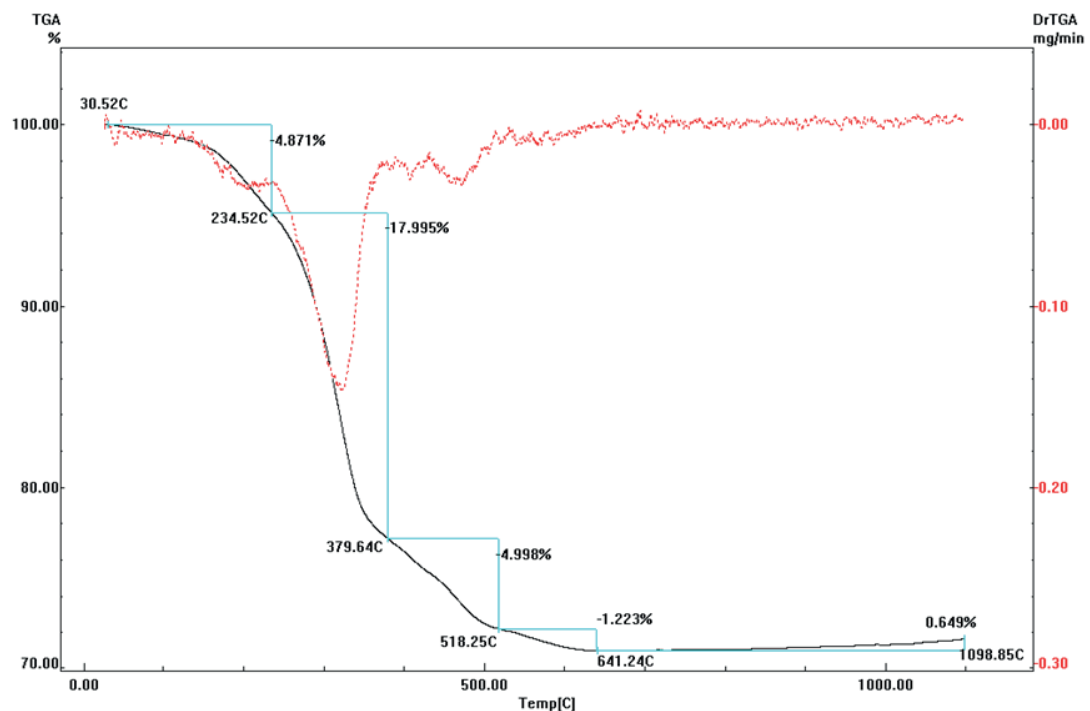


Figura 3 - Curvas TG, DTG e DTA para a suspensão de NiO/YSZ.

O comportamento reológico das suspensões indica o nível de floculação das partículas na solução. As medidas reológicas foram feitas no Reômetro Haake Rheostress 600 em modo de taxa controlada. Como exemplo, a Figura 4 mostra a análise reológica da suspensão de CGO.

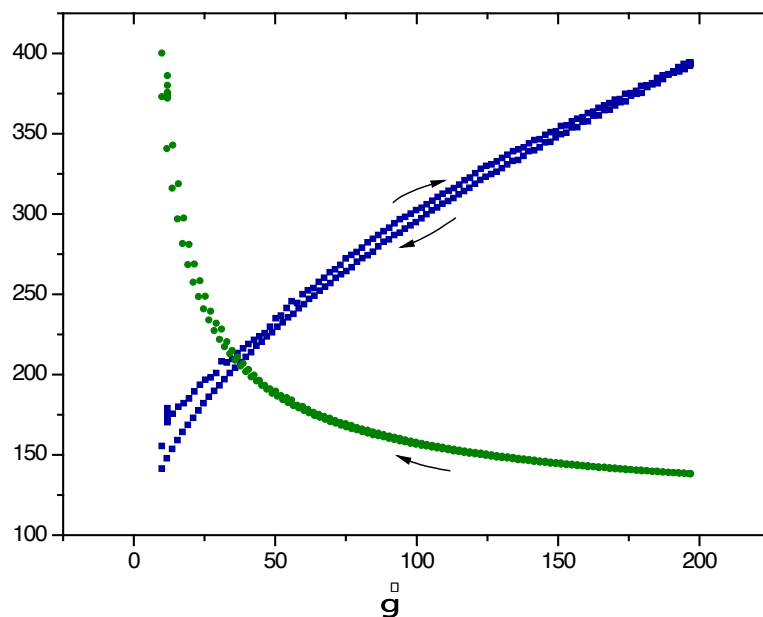


Figura 4 - Curvas de fluxo da suspensão produzida com 40 % de pó CGO.

Para a Figura 4, pode-se interpretar o gráfico de maneira que é indicada que a suspensão de CGO apresentou comportamento pseudoplástico, ou seja, viscosidade decresce com o aumento da taxa de cisalhamento. Esse comportamento favorece a deposição da suspensão. No caso da serigrafia, a passagem da suspensão através da tela é favorecida. Quanto ao comportamento ao longo do tempo, a suspensão apresentou-se levemente tixotrópica, isto é, a viscosidade diminui ligeiramente ao longo do tempo.

## 2.2 Preparo dos filmes de eletrólito e eletrodo

Foram utilizadas três técnicas de deposição, escolhidas de acordo com as características desejadas para cada filme. Os filmes de anodo foram preparados por colagem em fitas (*tape casting*), os de eletrólito por pincel e areografia e os de catodo por serigrafia.

Na técnica *tape casting*, a suspensão precursora do anodo é vertida em um compartimento do equipamento com uma saída móvel, chamada de *doctor blade*, cuja altura regulável determina a espessura do filme. Abaixo do *blade*, move-se uma esteira que faz o arraste da suspensão. O *doctor blade* foi ajustado para formar filmes de anodo com espessura de 1,0 mm. A Figura 5 mostra uma visão superior e lateral de parte do *Tape Casting* durante o processo.

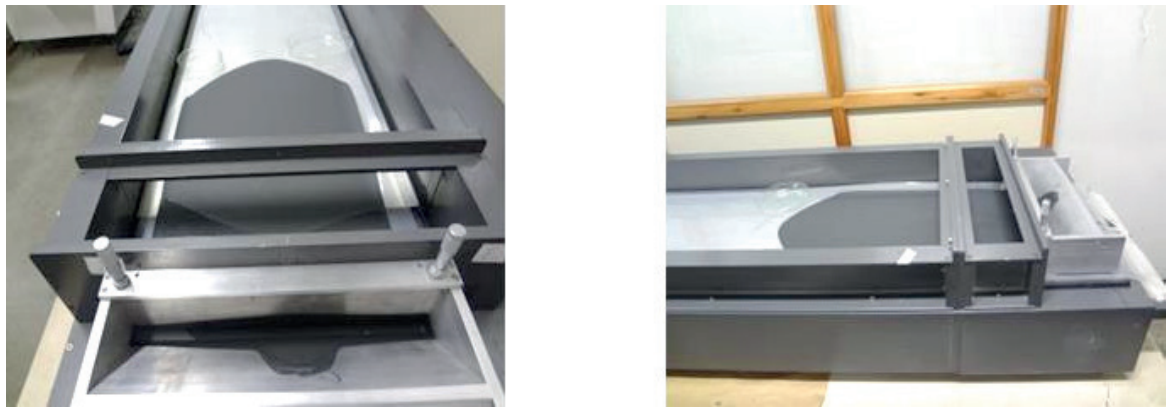


Figura 5 - Processo de colagem de fita de anodo: visão superior (esquerda) e lateral (direita) de parte do aparelho de Tape Casting durante a colagem da fita de anodo.

A deposição do filme de eletrólito de YSZ foi realizada por areografia sobre a pastilha de anodo usando um equipamento da marca Aeromax, modelo AE-10. Foram realizadas 3 deposições de filme. Após essas deposições foi realizado o tratamento térmico do filme e, posteriormente, os mesmos foram sinterizados a 1500 °C por 6h.

Os filmes de CGO foram elaborados por serigrafia em equipamento Screen printer semiautomática EKRA E1HYB com tela de 150 mesh. Os substratos utilizados foram os anodos de NiO/YSZ recobertos com os filmes de YSZ. Após a obtenção da espessura desejada, as amostras foram sinterizadas em forno.

Os filmes de LSCF foram elaborados, semelhantemente aos filmes de CGO, por serigrafia com tela de 275 mesh para o catodo funcional e 325 mesh para o catodo coletor. Os substratos utilizados foram os anodos de NiO/YSZ recobertos por filmes de YSZ e de CGO. Após a aplicação do número apropriado de camadas (4 para o catodo funcional e 18 para o catodo coletor) as amostras foram sinterizadas.

A principal técnica utilizada para a caracterização dos filmes das células foi a microscopia eletrônica de varredura (MEV). Por meio das imagens obtidas foi possível diferenciar cada filme, bem como, verificar suas estruturas. Tal análise permite, entre outros, o controle de camadas com características intermediárias entre o eletrodo e o eletrólito. Essas camadas, denominadas Camadas Funcionais (CF), proporcionam um gradiente de composição e de porosidade que evita incompatibilidades químicas e mecânicas entre materiais. A camada externa e porosa do eletrodo, responsável pelo contato eletroquímico com o circuito externo, é denominada Camada Coletora de Corrente, ou simplesmente Camada Coletora (CC). A Figura 6 apresenta a microestrutura de um catodo bicamada CF/CC.

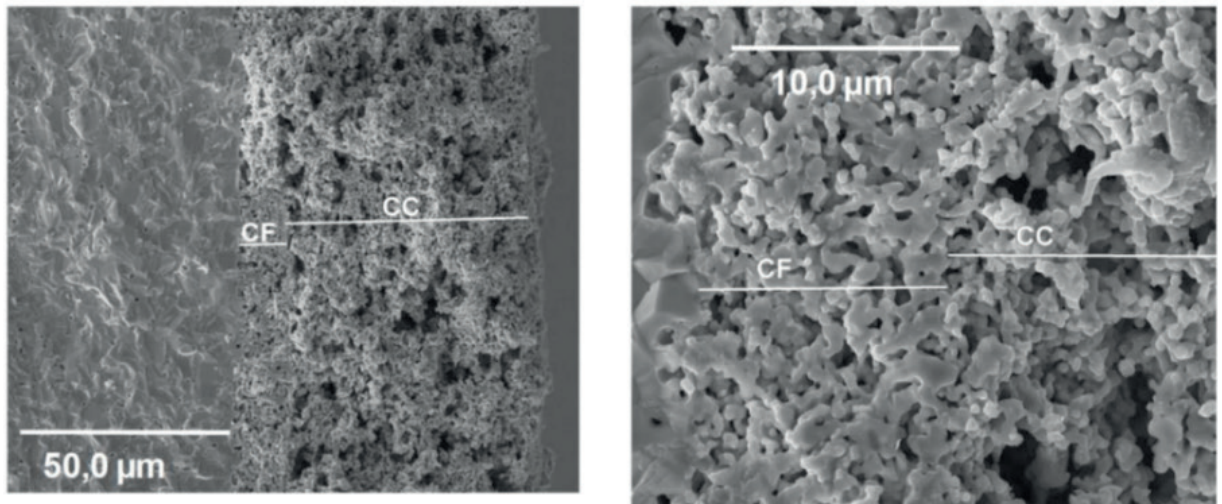


Figura 6 - Microestrutura de um catodo bicamada.

Foi possível obter eletrodos homogêneos, aderentes e com porosidade e espessura adequadas à posição relativa do eletrodo (catodo funcional ou coletor de corrente). Quanto ao catodo coletor, o formador de poros de grafite possibilitou a obtenção de uma estrutura porosa e com boa condutividade, sendo apropriada a utilização da composição  $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,4}\text{Co}_{0,8}\text{Fe}_{0,2}\text{O}_{3-5}$ . Já o catodo funcional mostrou-se eficiente quando preparado na forma do compósito de  $\text{La}_{0,54}\text{Sr}_{0,44}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{0,8}\text{O}_3/\text{Gd}_{0,2}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{2-5}$ , utilizando-se pó de menor granulometria, quando comparado ao empregado para o catodo coletor e sendo o filme sinterizado em temperatura superior a do catodo coletor (1200 °C e 1140 °C respectivamente).

#### 2.4. Célula completa de 20 e 80 mm

As células elaboradas pelo LaMPaC seguiram a estrutura apresentada na Figura 7, utilizando-se como suporte um anodo de óxido de níquel (NiO) com zircônia estabilizada com ítria (ZEI ou YSZ). Após a fita ter sofrido os tratamentos térmicos, foi depositado sobre ela um filme de ZEI por spray e outro filme de céria dopada com gadolínio (CGO) por serigrafia. Após as camadas dos eletrólitos terem sido densificadas por sinterização, depositaram-se filmes de ferrita cobaltita de lantânio dopada com estrôncio (LCSF) por serigrafia.

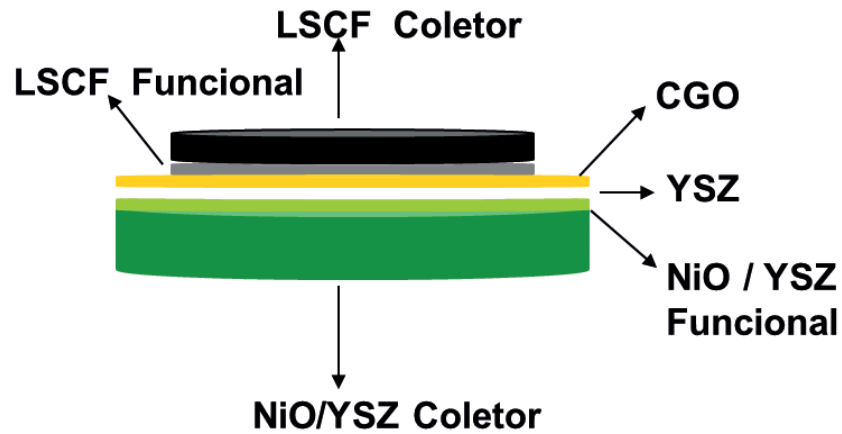


Figura 7 - Desenho das camadas que compõem a célula LaMPaC

A Figura 8 mostra uma imagem da seção transversal da célula LaMPaC obtida por microscopia eletrônica de varredura após as etapas de otimização. Nessa imagem, se observa a presença da bicamada de catodo, formada catodo funcional (CF) e pelo catodo coletor de corrente (CC).

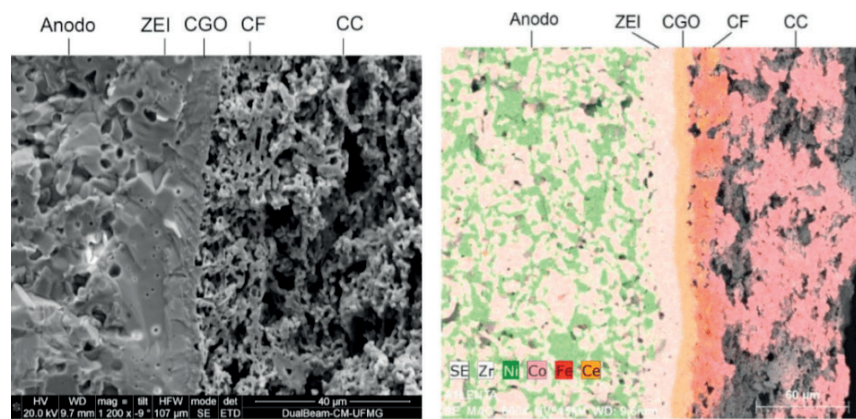


Figura 8 Imagem obtida por MEV da célula LaMPaC otimizada.

A medição eletroquímica das células botões, de 20 mm de diâmetro, utilizou o equipamento fabricado pela Norwegian Electro Ceramics SA, modelo Probostat. Ele é composto por uma coluna cerâmica e uma base que recebe a alimentação de gases e coleta a energia gerada. Utilizou-se também um potenciostato, um forno tubular e um sistema de controle de fluxo de gases.

Na Figura 9, observa-se o comportamento das medidas eletroquímicas realizadas para a célula LaMPaC otimizada com camadas funcionais, na qual se verificou uma densidade de potência máxima de 1055 mW/cm<sup>2</sup> a temperatura de 800°C.

Após a otimização dos componentes da célula botão, a próxima etapa foi a mudança no tamanho da célula de 20 para 80 mm. O aumento do tamanho do anodo foi o principal desafio a ser superado, visto que este é o suporte da célula. Para o desenvolvimento de anodos com maior área, foi necessário minimizar os defeitos das

fitas obtidas por colagem, no que se refere à redução do número de bolhas e trincas. Esse resultado foi alcançado pela desaeração da suspensão e controle da velocidade de evaporação do solvente. Novos estudos foram realizados a fim de impedir o empenamento das peças. Esse resultado foi alcançado mediante o uso, durante a sinterização, de peças cerâmicas compressoras com peso controlado. Na Figura 10 é ilustrada a diferença de tamanho entre as células de diferentes tamanhos.

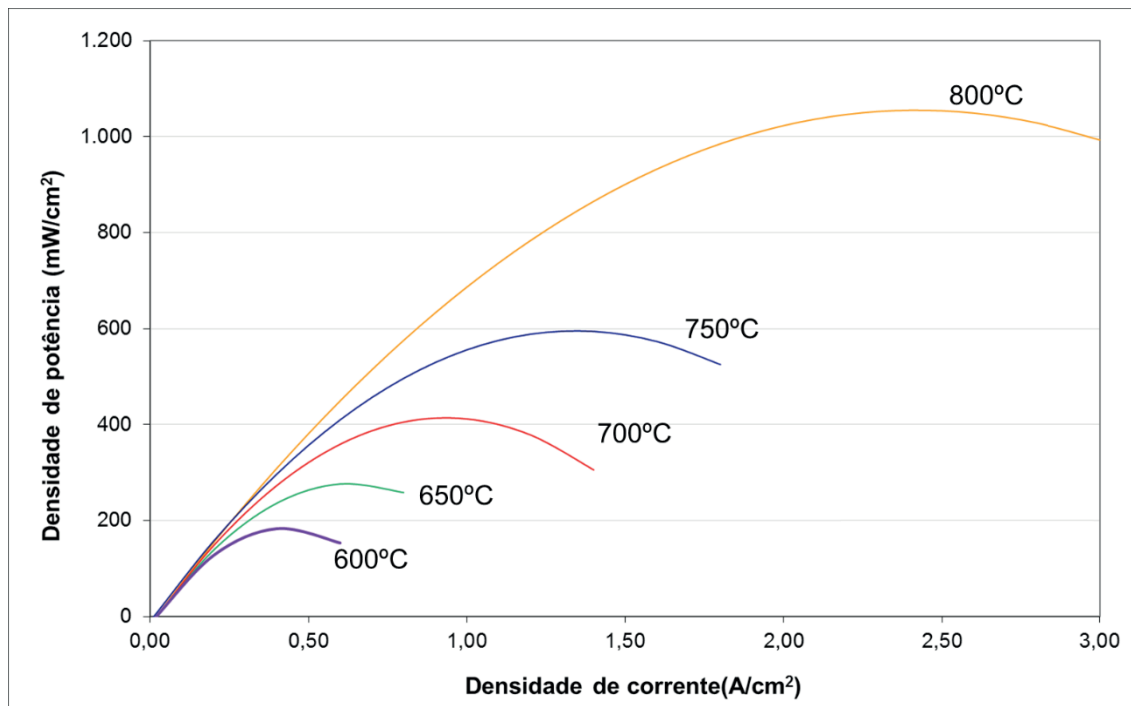


Figura 9 - Gráfico das medidas elétricas realizadas na célula com camadas funcionais nas temperaturas de 600, 650, 700, 750 e 800°C.

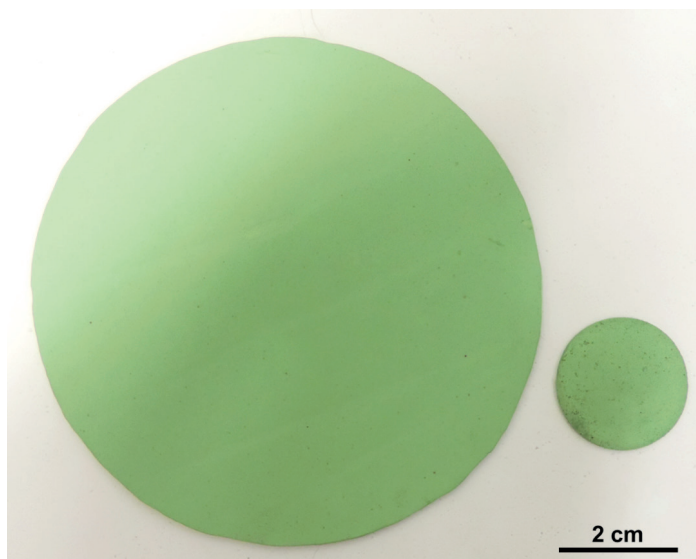


Figura 10 - Imagem dos anodos com áreas de catodo de 80 e 20 mm, respectivamente, obtidos por moldagem de fitas usados como suporte para as células a combustível.

## 2.5. Protótipo de 100 W

Através dos resultados ilustrados na Figura 9, foi-se calculado que para uma



potência de 100 W seriam necessárias três células com área catódica de 80 mm. Sendo assim, foi-se construído um protótipo, utilizando como interconectores aço do tipo Inconel, usinados sob desenho específico para otimizar a troca dos gases com as células. Cada célula foi selada em um suporte metálico e em seguida empilhada, gerando o protótipo de 100 W, como apresentado na Figura 11.

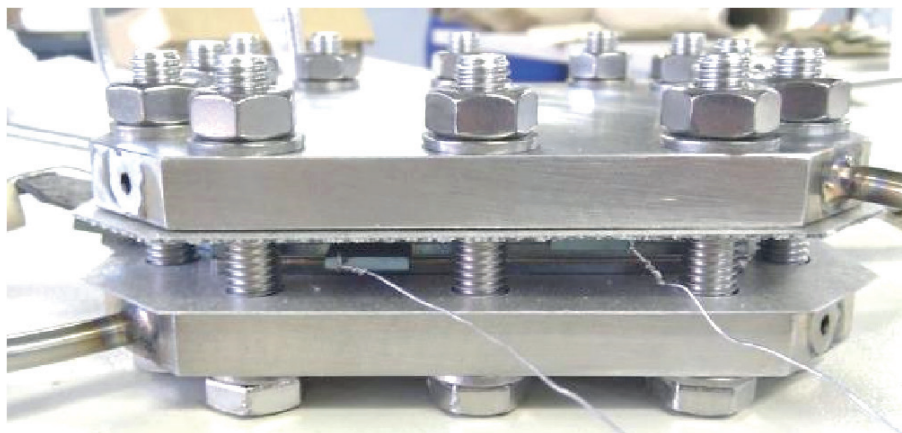


Figura 11 - Protótipo de 100 W montado

A montagem do protótipo foi realizada em 9 etapas, resumidas na Figura 12, detalhadas:

- Etapa 1: A base do protótipo é o suporte do empilhamento e possui as tubulações de entrada dos gases. Junto à base, se encaixam os parafusos para fechamento da pilha.
- Etapa 2: Em seguida, coloca-se a folha de mica, formatada à montagem do protótipo. Ela visa garantir a estanqueidade do sistema e prover o isolamento elétrico entre o interconector metálico do catodo e a base. Fixa-se a folha por meio de pinos-guia que mantém a montagem alinhada.
- Etapa 3: Coloca-se o interconector referente ao catodo. Ele possui a função de distribuir o oxigênio por igual na célula do protótipo, além de realizar o contato elétrico.
- Etapa 4: Novamente coloca-se uma folha de mica para garantir o isolamento elétrico entre o interconector e o suporte metálico, bem como, a estanqueidade do sistema.

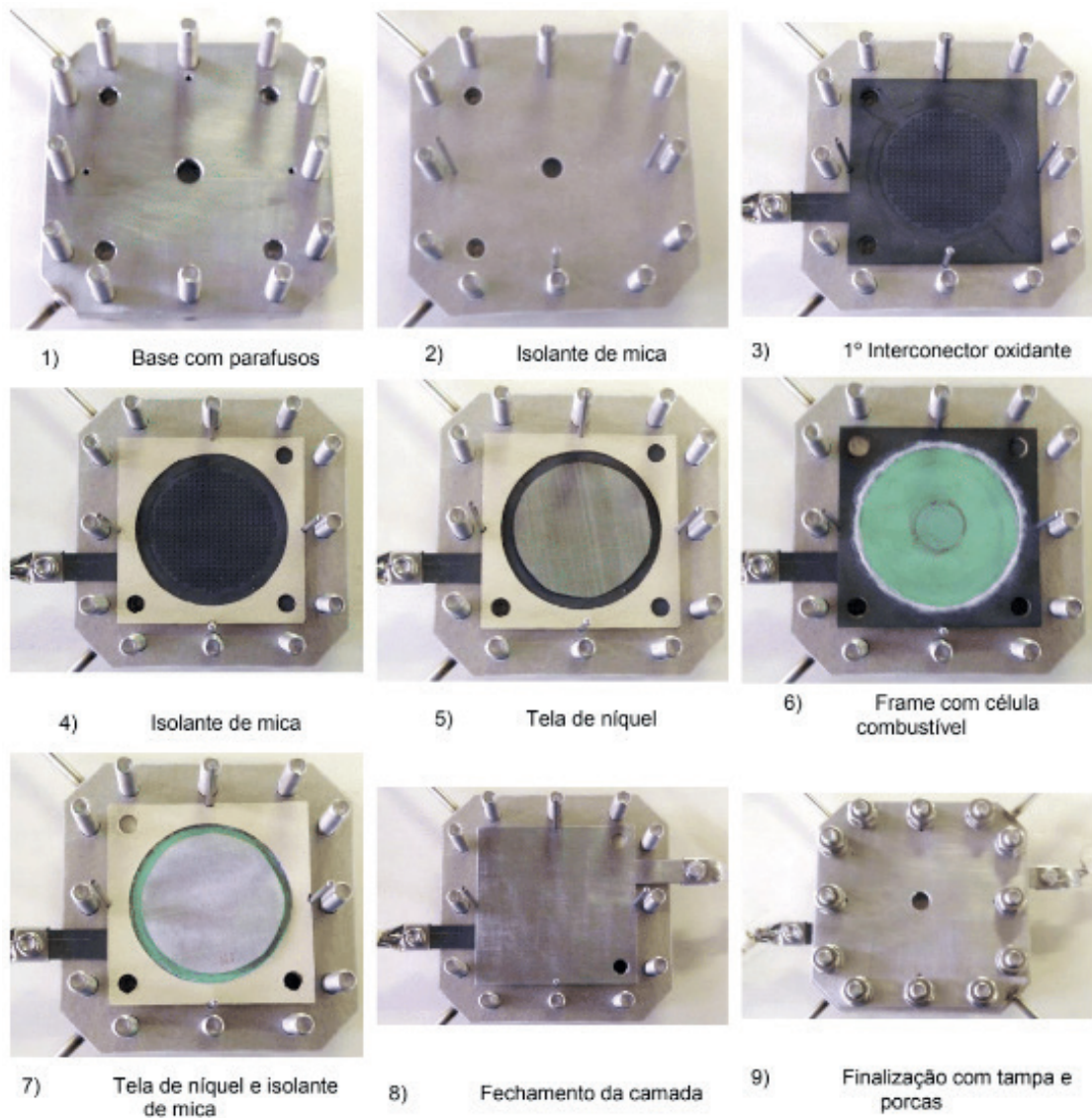


Figura 12 - Etapas da montagem do protótipo de 100 W.

- Etapa 5: Aplica-se a tela coletora de corrente, que realiza o contato elétrico entre catodo e interconector metálico. Ela deve possuir boa condutividade a altas temperaturas e resistência para operar em atmosferas oxidantes.
- Etapa 6: Instala-se o suporte metálico com a célula propriamente dita, já com o selante vítreo.
- Etapa 7: Em seguida, instala-se a mica e a tela coletora de corrente do anodo, preparando a camada para receber o interconector no qual passará o hidrogênio.
- Etapa 8: Repetem-se as etapas até empilhar três células. Coloca-se o interconector de fechamento do anodo, que possui apenas a face de passagem do hidrogênio. Coloca-se uma folha de mica para isolar o interconector final e a placa superior do protótipo e retiram-se os pinos-guia.
- Etapa 9 Coloca-se a placa superior do protótipo que possui a tubulação de

saída dos gases. O fechamento e compressão do protótipo são assegurados por 12 porcas.

Os testes elétricos do protótipo de 100 W foram divididos em duas partes, uma de aquisição dos dados e outra de tratamento dos dados. O sistema montado, foi composto por:

- Forno tubular vertical bipartido que atinge temperaturas de até 1000°C;
- Sistema de controle de fluxo de gases;
- Computador para coleta, controle e armazenamento de dados;
- Carga eletrônica de 1200 W modelo 8514 da marca Bk Precision;
- Sistema Agilent modelo 34980A para capturar as leituras de dados em multicanais.

Os testes elétricos iniciaram-se com aquecimento do sistema até atingir a temperatura de 800 °C. Em seguida, foi realizado o processo de redução do anodo de NiO para Ni. Esse processo consistiu na injeção controlada de hidrogênio no lado do anodo por 40 horas, de maneira a encontrar o melhor fluxo para o processo. A redução do anodo foi monitorada por medidas de potencial em circuito aberto. O processo foi considerado finalizado quando o valor do potencial de cada célula atingiu 1,1 V, totalizando 3,3 V.

Posteriormente, ao processo de redução, iniciou-se o acionamento do protótipo com a injeção de oxigênio no lado do catodo. Utilizou-se as vazões de 250 mL/min para o hidrogênio do lado do anodo e um fluxo de 500 mL/min de oxigênio para o lado do catodo. Para aquisição e posterior tratamento dos dados, variou-se a corrente elétrica em intervalos de 2,5 A até alcançar 40 A. No valor máximo de corrente o protótipo atingiu um pico de 115 W de potência, alcançando o objetivo desta etapa. A Figura 13 mostra o gráfico da potência gerada ao longo do tempo após a etapa de redução das células.

Após 50 horas de experimento o fluxo dos gases foi interrompido, o sistema foi desligado e iniciou-se o tratamento dos dados obtidos. A Figura 14 apresenta as imagens do protótipo antes do acionamento e depois do resfriamento do sistema.

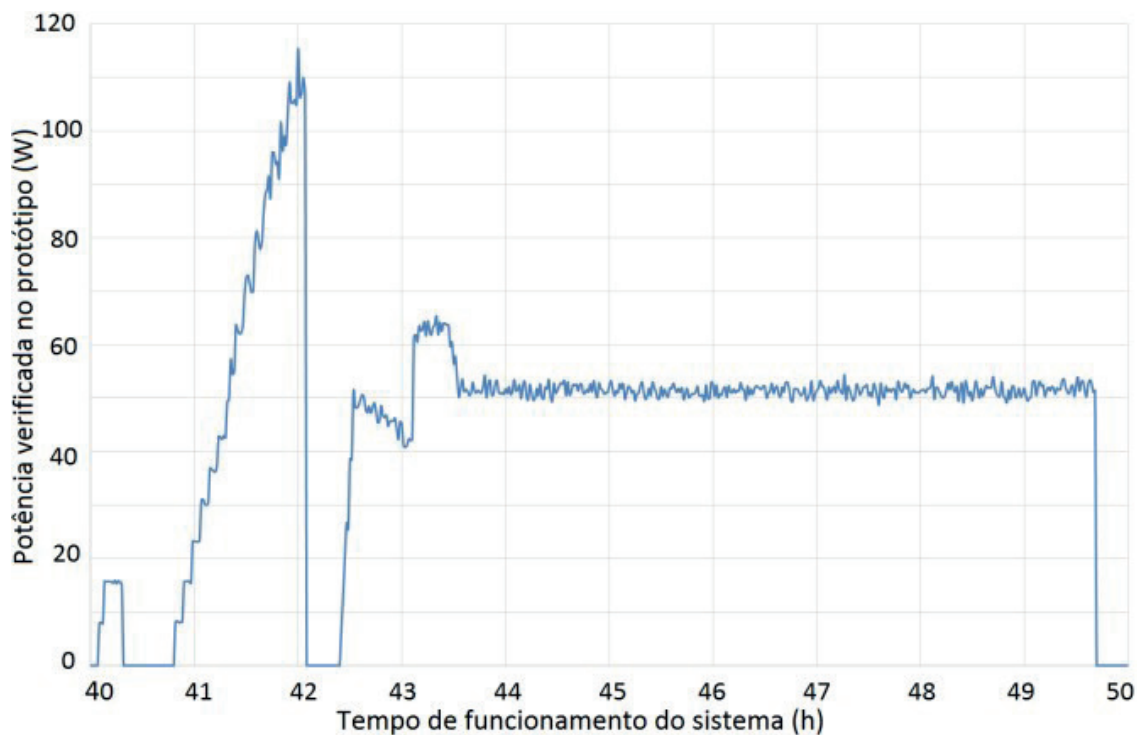


Figura 13 - Gráfico da potência verificada no protótipo, do início dos experimentos com a corrente até o término.

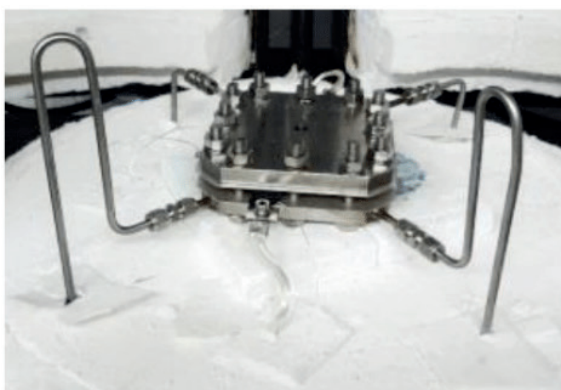


Figura 14 - Fotografias do protótipo de 100 W, antes (na esquerda) e após (na direita) o acionamento do sistema.

## 2.6. Protótipo de 1KW

Por razões de segurança, limitações no controle de temperatura e estanqueidade dos gases, foram montados apenas 2 dos 6 módulos necessários para gerar a potência de 1 kW. Os módulos, um contendo 3 células e outro com 2 células, foram montados em série. A montagem e os testes seguiram procedimento e especificação de células semelhantes aos adotados para o protótipo de 100 W.

Os testes de funcionalidade do protótipo foram realizados no LaMPaC. Inicialmente o protótipo foi aquecido a uma até 800 °C. Em seguida, iniciou-se o processo de redução lenta com a alimentação de hidrogênio a 150 mL/min por 5 horas no lado do anodo. Esse procedimento foi adotado para se evitar a quebra das células devido à retração que ocorre durante a redução eletroquímica do anodo.

A redução total do NiO a Ni foi alcançada com a injeção de uma mistura de hidrogênio e nitrogênio a uma vazão de 2,5 L/min por mais 5 horas. Então, o fluxo de nitrogênio diminuído gradativamente e o de hidrogênio aumentado até se alcançar uma vazão somente de hidrogênio. O processo de redução foi encerrado quando o potencial do protótipo atingiu 5,4 volts, após 10 horas de experimento. A Figura 15 apresenta a evolução do potencial de cada célula durante o processo de redução e acionamento do protótipo.

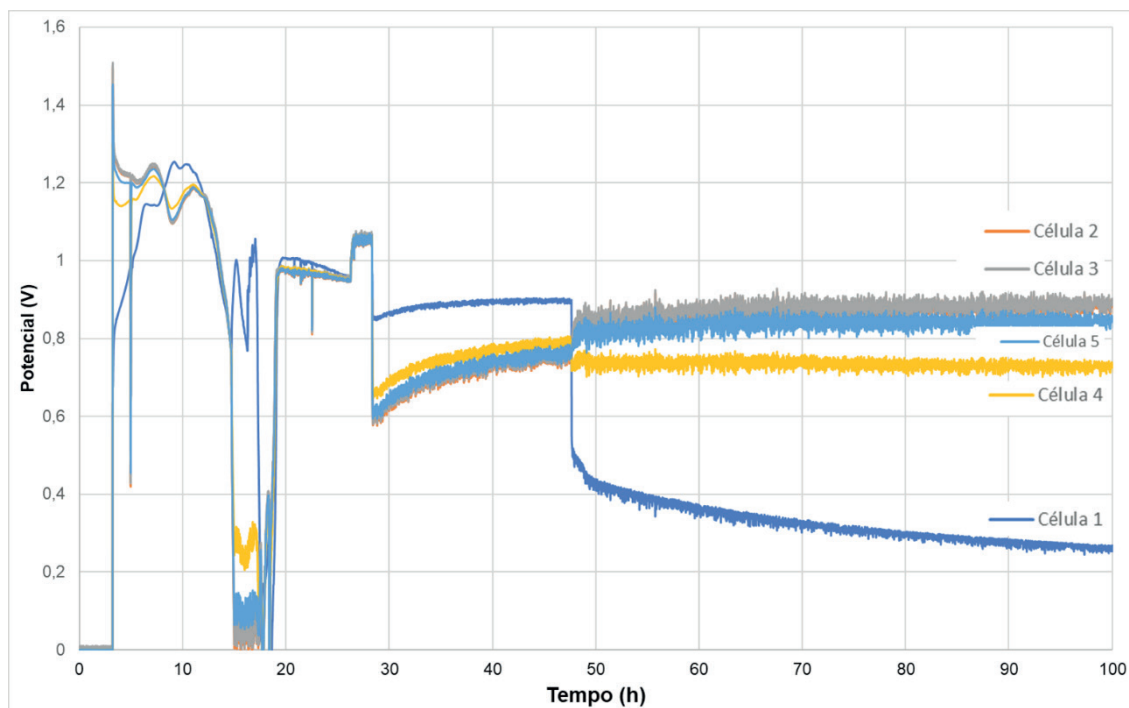


Figura 15 - Gráfico das medidas do diferencial de potencial em V em relação ao tempo, para cada célula do protótipo.

O valor experimental de 1,1 volts de potencial de circuito aberto alcançado por cada célula após o término da etapa de redução indica a completa redução das células e a estanqueidade do sistema. Ao fim do processo de redução, iniciou-se o acionamento do protótipo a 800 °C. Nessa fase, o catodo foi alimentado com oxigênio a um fluxo de 3,0 L/min e o anodo com hidrogênio a um fluxo de 1,0 L/min. A Figura 16 apresenta o potencial do protótipo durante seu processo de redução e de funcionamento. Após o acionamento do protótipo, próximo a 10 horas de experimento, o potencial diminuiu de 5,4 V para 3,0 V devido a perdas por polarização no anodo e no catodo. Em seguida, ocorre um aumento gradativo do potencial até 20 horas de experimento, quando o potencial atinge o valor máximo de 4,4 V. Logo após as 20 horas de experimento notou-se uma queda do potencial para 3,8 V.

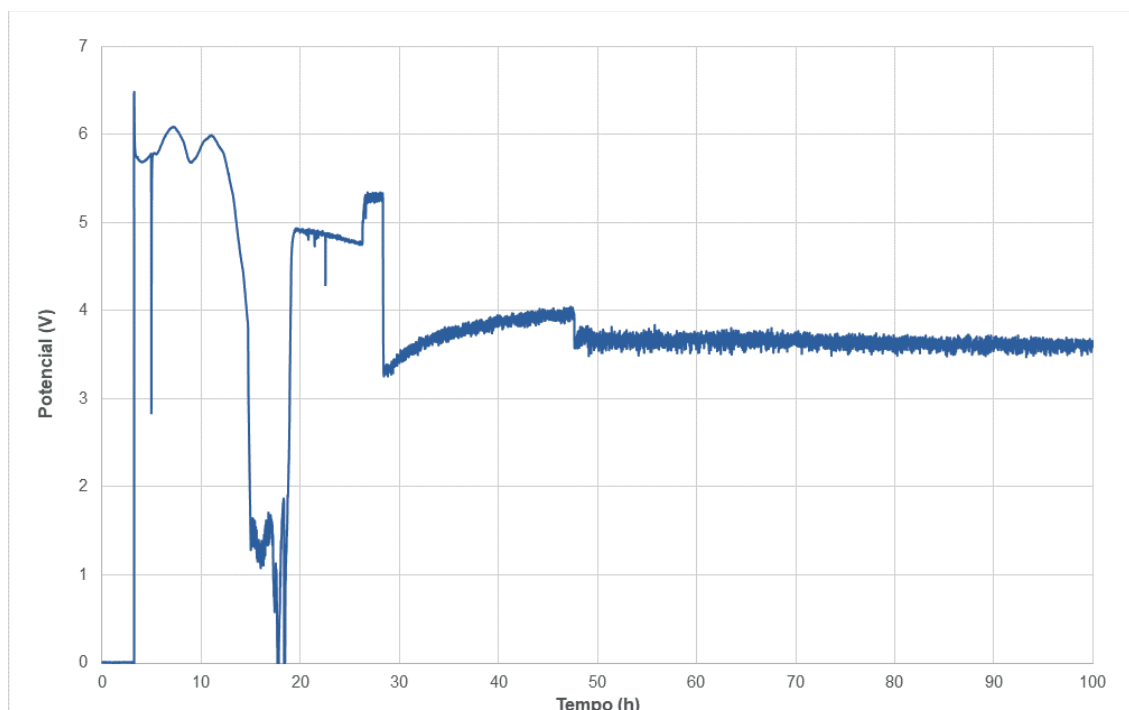


Figura 16 - Gráfico das medidas do diferencial de potencial em V, para o protótipo durante todo o tempo de funcionamento do mesmo.

Esta queda foi atribuída às perdas de rendimento das células 1 e 4. Durante o restante do experimento o potencial se manteve próximo a 3,8 V com ligeira queda após 80 horas de funcionamento. As perdas de rendimentos das células 1 e 4 podem estar relacionadas a vários fatores, dentre eles, a deterioração ou quebra das células, a falta de homogeneidade de temperatura dos gases ou reações paralelas entre os componentes das células. Por medidas de segurança, após 100 horas de funcionamento o protótipo foi desligado. Posteriormente, quando desmontada a pilha para inspeção verificou-se que a célula 1 possuía uma trinca. Já para a célula 4 verificou-se que se encontrava intacta.

Na Figura 17 observa-se a curva da potência gerada pelo protótipo, obtida pela multiplicação da diferença de potencial em volts, pela corrente medida em amperes. Imediatamente após o acionamento do protótipo, observou-se um aumento gradativo entre a vigésima oitava e a quadragésima sexta hora de experimento, até o valor máximo de 119 W. Em seguida, ocorreu uma diminuição da potência devido à queda de potencial das células 1 e 4. Entretanto, observa-se que a potência da célula estava crescente, portanto é esperado um adicional na potência caso não houvesse a trinca na célula 1.

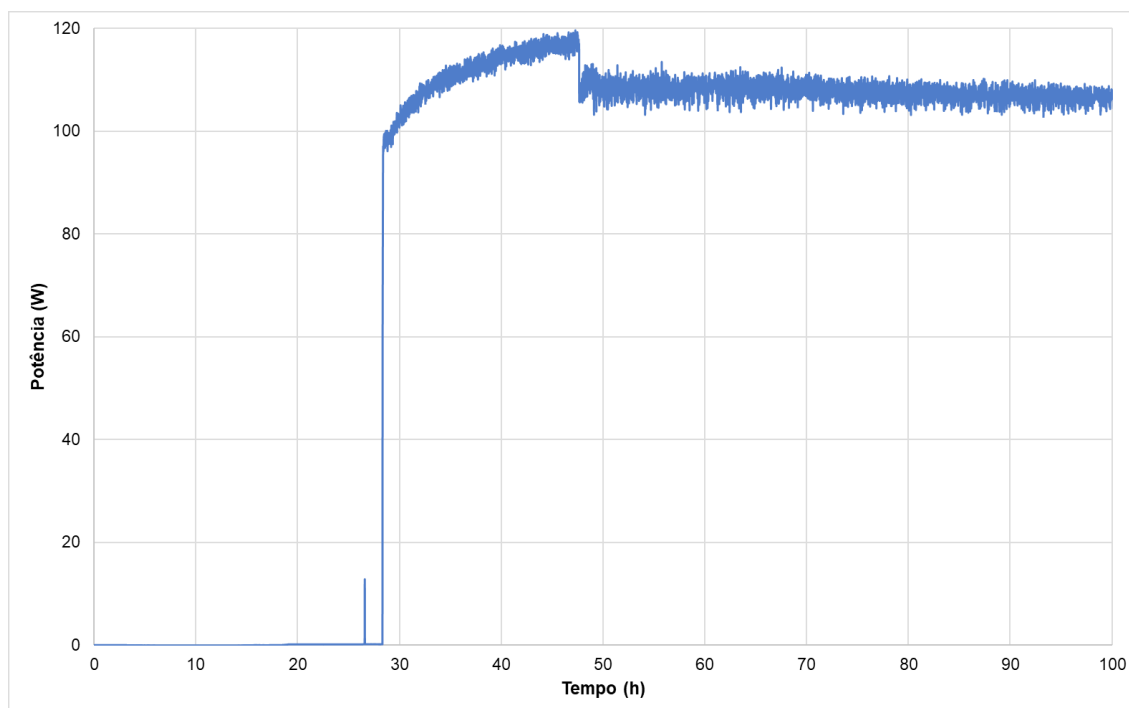


Figura 17 - Gráfico da evolução da potência em função do tempo

De acordo com os estudos feitos no LaMPaC, foi estimada uma potência de 165 W para um conjunto de 5 células com 80 mm de diâmetro. Dessa forma, a potência alcançada pelo protótipo está próxima ao valor esperado para uma pilha com cinco células. O sistema continuou funcionando por aproximadamente 100 horas.

### 3 | CONCLUSÃO

A pilha a combustível é uma das principais alternativas na busca de sistemas de geração de energia mais eficientes e com baixa emissão de poluentes. O desenvolvimento deste projeto permitiu a construção de dois protótipos de PaCOS com potências superiores a 100 W.

O protótipo de 100 W alcançou uma potência de pico de 115 W e o sistema se manteve estável por 50 horas com uma potência média de 50 W. O principal protótipo, formado por dois módulos contendo 2 e 3 células cada, funcionou plenamente por quase 20 horas, alcançando uma potência de 119 W. Embora o protótipo de 1 kW não tenha sido montado com todos os módulos calculados, a potência obtida foi muito próxima à estimada por meio dos estudos de otimização realizados em células botões.

Esses resultados comprovam a eficiência dos sistemas testados e validam a proposição de um sistema em série. Trata-se do primeiro protótipo nacional com empilhamento e potência gerada acima de 150 W, o que coloca o grupo LaMPaC como pioneiro na montagem e acionamento de pilhas do tipo óxido sólido no Brasil.

De posse desses resultados os próximos estágios a serem atingidos estão na utilização de etanol como combustível para as células, o que requer a elaboração

de novos anodos para PaCOS. Também, devem ser elaborados novos projetos de design e de fluxos térmicos e de gases que permitam o controle de temperatura e estanqueidade dos gases em protótipos de potências superiores.

## 4 | AGRADECIMENTOS

À Cemig pelo apoio técnico, nas pessoas de Alaíse J.V. Madureira<sup>2</sup> e Cláudio H. F. da Silva, e financeiro. Ao Centro de Microscopia da UFMG pela geração das imagens de microscopia. Ao CNPq, CAPES pelas bolsas para os alunos de pós-graduação que compõem a equipe do projeto.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. M. **Otimização de anodos para célula a combustível de óxido sólido fabricados por colagem de fitas**. Dissertação (Dissertação em Química) UFMG, Belo Horizonte, 2014.

CHU, S.; MAJUMDAR, A. **Opportunities and challenges for a sustainable energy future**. Nature, v. 488, n. 7411, p. 294-303, 2012.

DOMINGUES, R. Z, MATENCIO, T e ALMEIDA, R. M. **GT291 - Desenvolvimento de um protótipo de pilha a combustível de óxido sólido com potência de geração de 1 kW**. LaMPaC, Belo Horizonte, MG, Relatório Técnico. RT 09, Setembro. 2014.

FERNANDES, Antônio de Pádua Lima. **Desenvolvimento e caracterização eletroquímica de pilha a combustível de óxido sólido**. Tese (Tese em Química) UFMG, Belo Horizonte, 2016.

FERNANDES, Antônio de Pádua Lima. **Uso da técnica de serigrafia para deposição de filmes de catodo de Pilha a Combustível de Óxido Sólido**. Dissertação (Dissertação em Química) UFMG, Belo Horizonte, 2012.

GUO, K. W. **Green nanotechnology of trends in future energy: a review**. International Journal of Energy Research, v. 36, p. 1-17, 2012.

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; SAFARI, A. **Comparative study of different fuel cell technologies**. Renewable & Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 1, p. 981-989, 2012.

PEREIRA, Gislaine de Castro Oliveira. **Preparação e Caracterização de anodo Ni/YSZ com aplicação em Pilhas a Combustível de Óxido Sólido**. Dissertação (Dissertação em Química) UFMG, Belo Horizonte, 2013.

SANTOS, J. A. F.. **Elaboração e caracterização de La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>Co<sub>y</sub>Fe<sub>1-y</sub>O<sub>3-d</sub> para catodo de Pilhas a Combustível de Óxido Sólido**. Dissertação (Dissertação em Química) UFMG, Belo Horizonte, 2011.

SANTOS, J. A. F.. **Otimização da Microestrutura de Componentes de Pilhas a Combustível de Óxido Sólido a Temperaturas Intermediárias**. Tese (Tese em Química) UFMG, Belo Horizonte, 2014.

SILVA, C. H. F (Org.). **Alternativas Energéticas - Uma visão Cemig**. Cemig: Belo Horizonte, 2012, pp. 346-349. [Online] Disponível em <http://www.cemig.com.br>.



US Department of Energy. **Fuel cell Handbook**. US Department of Energy: West Virginia, 2004, pp. 1-34. [Online]. Disponível em <http://www.netl.doe.gov>.

WACHSMAN, E. D.; LEE, K. T. **Lowering the Temperature of Solid Oxide Fuel Cells**. *Science*, v. 334, n. 6058, p. 935-939, 2011.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-086-5



9 788572 470865