



Encontro Internacional  
de Produção Científica  
24 a 26 de outubro de 2017

ISBN 978-85-459-0773-2

## DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA CONTROLE TÉRMICO EM MICRO-ONDAS COMERCIAL PARA A APLICAÇÃO NA SÍNTESE DE MATERIAIS POROSOS

Guilherme Piovezan Otto<sup>1</sup>; Raphael Leonardo Bulla<sup>2</sup>, Julio César Daineze de Oliveira<sup>3</sup> Jean Rodriga Bocca<sup>4</sup>, Murilo Pereira Moisés<sup>5</sup> e Silvia Luciana Fávaro<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Maringá PIBITI/CNPq-UEM, gui.potto@gmail.com

<sup>2</sup>Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Maringá PIBITI/CNPq-UEM, bulla.rapha@gmail.com

<sup>3</sup>Professor do Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Maringá, jcdoliveira@uem.br

<sup>4</sup>Professor do Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Maringá, jrbocca@uem.br

<sup>5</sup>Professor, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, murilomoises@hotmail.com

<sup>6</sup>Orientadora, Doutora, Professora do Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Maringá, slfrosa@uem.br

### RESUMO

Novas classes de materiais porosos como zeólitas e *metal-organic framework* (MOF) são promissoras classes de materiais que possuem uma alta gama de aplicações. A rota de obtenção mais utilizada destes materiais é lenta e, portanto, custosa. Entretanto, a produção destes materiais via aquecimento por micro-ondas se mostra muito mais eficiente, uma vez que o tempo de produção pode ser reduzido em até 200 vezes. Ainda assim, fornos microondas laboratoriais profissionais possuem um alto custo, o que inviabiliza o seu uso. Este trabalho apresenta uma alternativa economicamente viável para a produção destes materiais via micro-ondas. Foi desenvolvido um sistema que possibilita o controle da temperatura de reações no interior do forno micro-ondas. O sistema proposto tem um custo total 12 vezes inferior do que fornos microondas laboratoriais comercializados, o que atesta sua viabilidade econômica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Automação, PID, Zeólita, MOF.

### 1 INTRODUÇÃO

As zeólitas, um material microporoso, foram descobertas em 1756 por um mineralogista sueco, Freiherr Axel Frederick Cronstedt, que denominou o grupo de minerais a partir das palavras gregas “zeo” (fervor) e “lithos” (pedra), ou seja, “pedras que fervem”, devido a sua característica peculiar de liberar bolhas ao serem imersas em água (ABADZIC; RYAN, 2001). Somente em 1926 a propriedade de adsorção e o termo “peneira molecular” – referente à inserção de pequenas moléculas e exclusão das maiores – foram atribuídos a um tipo de zeólita. (BARRER; DAVIES; REES, 1969)

Zeólitas são constituídas por tetraedros de sílica e alumina, ligados tridimensionalmente através de átomos de oxigênio. A carga negativa na estrutura é balanceada por cargas positivas de cátions, que dá a variedade de zeólitas existentes é a maneira como os tetraedros se unem associado à possível substituição de silício por vários outros elementos, e ao tipo de íon presente nos poros (FERREIRA, 1998). Os *Metal-organic framework* (MOF) são compostos microporoso que consistem em íons coordenados a moléculas orgânicas de um metal, e, podem formar estruturas porosas mono, bi ou tridimensionais.

Devido à capacidade de troca iônica das zeólitas, esses minerais têm sido amplamente utilizados no tratamento de efluentes industriais (DĄBROWSKI *et al.*, 2004), domésticos, água de abastecimento (DOULA, 2006), água subterrânea, drenagem ácida de minerações (COLELLA; DE'GENNARO; AIELLO, 2001) e solos contaminados. Além disso, MOFs e zeólitas apresentam promissoras aplicações em processos de catálise heterogênea, armazenamento e captura de gases, separação de gases, catálise, sensores químicos, dentre várias outras aplicações vinculadas a vários setores industriais, como lavanderias industriais, curtumes, indústrias químicas e petroquímicas, dentre outros.



A radiação de micro-ondas já é utilizada há mais de 40 anos como fonte de aquecimento em reações químicas, devido sua em aquecer rapidamente meios reacionais. Estes têm sido muito utilizados em diversas transformações químicas reduzindo seus tempos de realizações, muitas vezes de dias e horas para minutos ou segundos.

Evidentemente, já existem no mercado internacional diferentes fornos de micro-ondas que se adaptam a diversas finalidades, porém ainda com preços elevados que impossibilitam seu uso como equipamento de rotina em laboratório. Assim, muitos pesquisadores têm optado por desenvolver projetos próprios de fabricação de fornos ou utilizar fornos domésticos para fins laboratoriais, com ou sem adaptações. Jansen et. Al (JANSEN, 2001) mostra que um reator micro-ondas laboratorial custa em média de US\$30.000 e que, entretanto, um micro-ondas comercial modificado custa em média US\$ 1.500. Além disso, observa-se que o tempo de reação de uma Zeolita em fornos micro-ondas é de até 200 vezes menor quando comparado aos métodos tradicionais em bandejas térmicas. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi desenvolver um sistema de baixo custo para controle térmico em micro-ondas comercial para a aplicação na síntese de materiais porosos

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

- Forno Micro-ondas Comercial (2450MHz)
- Termopar com Isolamento mineral
- Arduino<sup>TM</sup>
- Elementos eletrônicos (Capacitores, resistores e tiristores)
- Teflon<sup>®</sup>

A metodologia empregada para a modificação do micro-ondas foi dividida nas seguintes etapas: mapeamento térmico, captação da temperatura, controle do magnetron, programação do microcontrolador e as modificações físicas feitas no forno.

O controle do magnetron, e por consequência o controle do aquecimento, foi feito através de TRIACs ligados no circuito primário do magnetron. Estes tiristores serão controlados diretamente pelo Arduino<sup>TM</sup> através de um circuito opto-isolado. Esta modificação foi feita neste ponto porque qualquer outra modificação dentro do forno significaria uma interferência nos circuitos de controle de outras funções do micro-ondas, como dos relés de segurança da porta, ventilação e controle de potência, e tal interferência não é desejável.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 DESIGN DO CIRCUITO DE CONTROLE

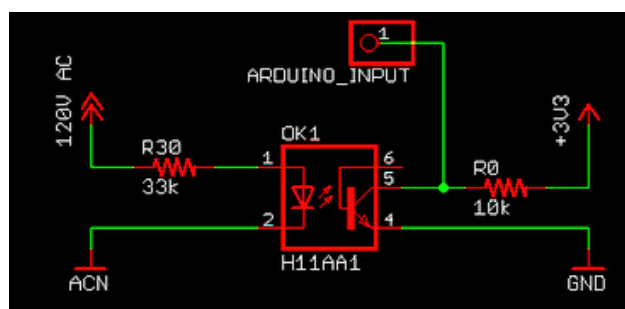
Para projetar um sistema de feedback, de controle de temperatura, para reações laboratoriais a fonte de alimentação do forno micro-ondas comercial foi redesenhada de modo que a energia fornecida ao magnetron pode ser ajustada de acordo com a diferença entre a temperatura real medida a partir de um objeto e uma temperatura de programada pelo usuário. As temperaturas reais foram medidas pelo termopar acoplado na fuselagem da câmara de aquecimento do micro-ondas. A diferença de temperatura foi calculada por um microcontrolador e foi usado como um sinal de realimentação. Quanto menor for a diferença, menor a energia enviada para o magnetron. Caso a temperatura real atinja ou exceda a temperatura predefinida pelo usuário, a potência fornecida para o magnetron será completamente sessada.





### 3.1.1 Circuitos de Detecção de Passagem por Zero

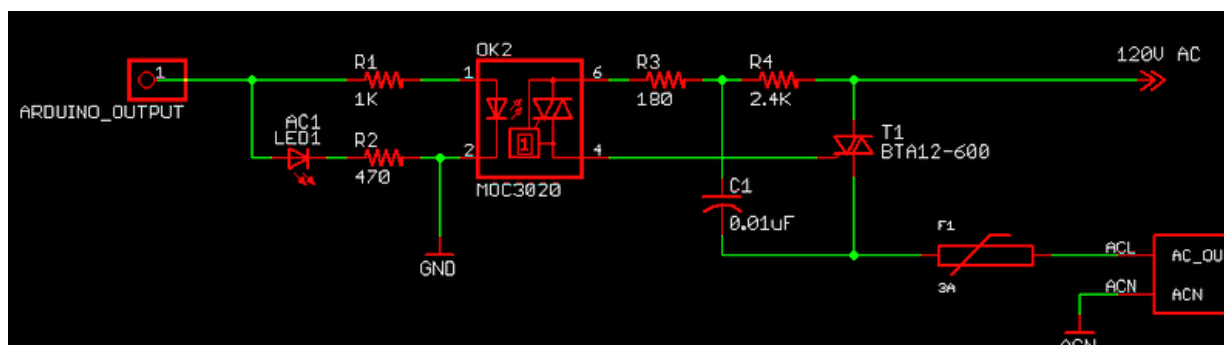
Um circuito de detecção de cruzamento zero foi desenvolvido para fornecer sinais de disparo a serem interpretados pelo microcontrolador. Este sinal serve como um marco inicial ao ponto que o TRIAC deve ser ligado. O circuito de detecção de cruzamento zero consiste em um opto-acoplador (H11AA1). O opto-acoplador transmite o sinal por luz, isso isola os seguintes componentes do microcontrolador da alta tensão, e assim os protege, como mostra a Error: Reference source not found. A velocidade de transmissão é suficientemente elevada para seguir o 60 Hz onda da corrente alternada.



**Figura 1:** Esquema do circuito de detecção de passagem por zero

### 3.1.2 Circuito de controle do TRIAC

Baseado no princípio de controle de fase foi utilizado um TRIAC (BTA41600B ST Microelectronics, EUA) para controlar a fonte de corrente alternada (120V, 60Hz) fornecida ao transformador de alta tensão do forno de micro-ondas, que alimenta o Magnetron. O TRIAC foi ligado ao lado de baixa tensão (a bobina primária) do transformador de alta tensão. Um opto-acoplador MOC3020 (Error: Reference source not found) foi usado como um isolador de alta tensão para proteger o microcontrolador e como fonte de comunicação entre o gatilho do TRIAC e o microcontrolador. A combinação do H11AA1 e MOC3020 protegem completamente o microcontrolador, através de isolamento, potenciais sobretensões no circuito do TRIAC.



**Figura 2:** Circuito de controle do TRIAC

## 3.2 LEITURA DO TERMOPAR

Devido a necessidade da utilização de um reator para conter os vapores da reação foram descartados o método por infravermelho, visto que os materiais dos reatores não são invisíveis a esta radiação. Deste modo, foi escolhido o termopar isolado como melhor método para a mensura



da temperatura, visto que, isolado eletricamente o termopar não sofre interferências com micro-ondas (FIGLIOLA; BEASLEY, 2007).

### 3.3 SOFTWARE

O software desenvolvido para o sistema incluiu um subprograma de interface de usuário, um subprograma para dados aquisição e pré-processamento, um subprograma para a comunicação com a tela LCD, um subprograma para realizar o cálculo do ângulo de disparo do TRAIC com base em um controle PID, e um subprograma para controlar o disparo do TRIAC. O programa foi escrito em C++, compilado e depurado pelo *open-source Arduino Software (IDE)*, e executado no microcontrolador Arduino Uno.

#### 3.3.1 Controle por Feedback

Para efetuar processamento dos dados adquiridos do sistema de forma controlada e inteligente foi utilizado um algoritmo de controle proporcional integral derivativo (PID). Esta técnica de controle de [processos](#) é um mecanismo de loop com feedback amplamente utilizado em sistemas de controle industrial. Um controlador PID calcula um valor de erro como a diferença entre uma variável de processo de medição e um ponto de ajuste desejado. O controlador tenta minimizar o erro através do ajuste do processo através do uso de uma variável manipulada.

Com isso, neste caso, o controle é feito de forma que quanto maior a diferença entre a temperatura real e a temperatura desejada maior será a potência fornecida ao magnetron, enquanto que essa diferença diminui gradativamente a potência fornecida diminui também.

## 4 CONCLUSÃO

Este trabalho mostra-se, acima de tudo, como uma adaptação de baixo custo, visto que, comercialmente seria necessário um investimento muito maior para obter um instrumento para a redução significativa de tempo para as reações de produção de zeólitas, MOFs e até mesmo outras reações de síntese de materiais. A partir deste trabalho abre-se espaço para muitas possibilidades de outros trabalhos sobre obtenção de materiais pela rota de reação via aquecimento por micro-ondas ou outras fontes de aquecimento que utilizam eletricidade. Foi possível adaptar o forno de forma simples, eficiente, compacta e barata.

## REFERÊNCIAS

ABADZIC, S. Dean; RYAN, Joseph N. Particle release and permeability reduction in a natural zeolite (clinoptilolite) and sand porous medium. **Environmental Science and Technology** v. 35, n. 22, p. 4502–4508, 2001.0013936X (ISSN).

BARRER, R M; DAVIES, J A; REES, L V C. Thermodynamics and thermochemistry of cation exchange in chabazite. **Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry** v. 31, n. 1, p. 219–232, 1969.00221902.

COLELLA, Carmine; DE'GENNARO, Maurizio; AIELLO, Rosario. Use of zeolitic tuff in the building



Encontro Internacional  
de Produção Científica  
24 a 26 de outubro de 2017

ISBN 978-85-459-0773-2

industry. **Reviews in mineralogy and geochemistry** v. 45, n. 1, p. 551–587 , 2001.

DĄBROWSKI, A. *et al. Selective removal of the heavy metal ions from waters and industrial wastewaters by ion-exchange method* .**Chemosphere**. [S.l.: s.n.]. , 2004

DECAREAU, R V. *Microwave Cooking and Processing: Engineering Fundamentals for the Food Scientist* . [S.l.]: New York: AVI Books. , 1985

DOULA, Maria K. Removal of Mn<sup>2+</sup> ions from drinking water by using Clinoptilolite and a Clinoptilolite-Fe oxide system. **Water Research** v. 40, n. 17, p. 3167–3176 , 2006.0043-1354 (Print).

FERREIRA, Katia Dias. *Uso de zeolitas na reducao do teor do cation niquel de efluentes galvanicos* . [S.l.]: Escola Politecnica-USP. , 1998

FIGLIOLA, Richard S; BEASLEY, Donald E. Teoria e projeto para medições mecânicas. **LTC–Livros Técnicos Científicos Editora SA, 4a ed., Rio de Janeiro** , 2007.

JANSEN, Koos. Chapter 6 - Microwave technology in zeolite synthesis. **Verified Syntheses of Zeolitic Materials** p. 39–42 , 2001. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444507037501046>>.978-0-444-50703-7.

X