



## Desenvolvimento de um conjunto de instruções de um sistema robótico autônomo para síntese de biodiesel em dispositivos microfluídicos

João Pedro C. Caldi\*, Harrson S. Santana, Mariana G.M. Lopes e Osvaldir P. Taranto

### Resumo

O trabalho em questão visa o desenvolvimento de códigos para controle de um sistema robótico autônomo que confeccione dispositivos microfluídicos, microrreatores, e realize a síntese de biodiesel nestes, utilizando-se da linguagem de programação G-Code (Código-G) para controle de uma impressora 3D adaptada para atuar como o sistema robótico. Os códigos, tanto para tais testes de calibração, quando para a futura validação do sistema robótico através da síntese de biodiesel, foram desenvolvidos e podem ser utilizados para síntese automatizada.

### Palavras-chave:

*Programação, Impressão 3D, Microfluídica.*

### Introdução

A indústria como um todo está passando por uma transformação em como ela produz os seus produtos, sendo liderada pelo que chamamos de indústria 4.0, com o objetivo a transformação da produção industrial por meio da digitalização e exploração de potenciais de novas tecnologias. Um sistema de produção da Indústria 4.0 é, portanto, flexível e permite produtos individualizados e personalizados (Rojko, 2017), além da existência de uma forte interação do digital com o real, uma vez que a indústria 4.0 oferece sistemas cibernéticos e físicos, os quais cooperam de maneira lucrativa com o objetivo de construir fábricas inteligentes (Dilberoglu, 2017), redefinindo o papel dos seres humanos. Seus conceitos fundamentais associados ao ambiente virtual incluem Internet das Coisas (*IoT*), *Big Data* e *Cloud Computing*, enquanto o seu domínio físico inclui Robôs Autônomos e Manufatura Aditiva (impressão 3D).

Tais novidades tecnológicas de digitalização e virtualização, aliado a sistemas robóticos, estão também transformando o modo como é feita a pesquisa no cenário científico atual, seja dentro das universidades ou em indústrias, sendo um exemplo o termo químico robótico, que vem ganhando espaço mundialmente. Esta expressão pode ser entendida como uma máquina autônoma capaz de realizar experimentos, processar dados e usar a informação que coleta para selecionar novas experiências (Peplow, 2014). Um exemplo recente foi apresentado por Duros et al. (2017), no qual os autores desenvolveram um sistema de manuseio de líquido e desenvolveram um conjunto de instruções para este, de modo que essa união permitiu a criação uma máquina capaz de descobrir e cristalizar moléculas.

Outro exemplo de um sistema que atua como químico robótico fora apresentado por Steiner et al. (2018), no qual eles mostram que operações unitárias foram implementadas em uma plataforma robótica modular usando uma linguagem de programação química que formaliza e controla a montagem de moléculas. Assim, eles a aplicaram na síntese de três compostos farmacêuticos sem qualquer intervenção humana, sendo que os rendimentos e purezas dos produtos e intermediários eram comparáveis, ou melhores, que os obtidos manualmente. Os trabalhos mencionados revelam como a automação pode ajudar pesquisadores e cientistas a aumentar a repetitividade e a reprodutibilidade dos ensaios experimentais, reduzindo o tempo necessário para gerar resultados e otimizar as condições de processos químicos, produzindo melhores resultados e que pode resultar em uma criação mais rápida de novos produtos e métodos de produção para a indústria química.

Ademais, nos últimos anos, empresas da indústria química e farmacêutica estão trabalhando em dois grandes conceitos de produção para melhorar ainda mais sua produção: produção de fluxo contínuo e modularização, conceitos estes que o grupo de pesquisa do qual este projeto compões tem se dedicado através da Microfluídica, que, segundo Roger C. Lo (2013), é definida como a ciência e tecnologia que envolve o estudo do comportamento dos fluidos, manipulação controlada de fluidos e o design de dispositivos ou sistemas que possa executar de forma confiável tarefas em microcanais com dimensões típicas de dezenas a centenas de micrômetros. As ferramentas desenvolvidas nessa área possibilitaram obter grandes vantagens nos processos em microescala, comparados aos métodos macroscópicos, sendo



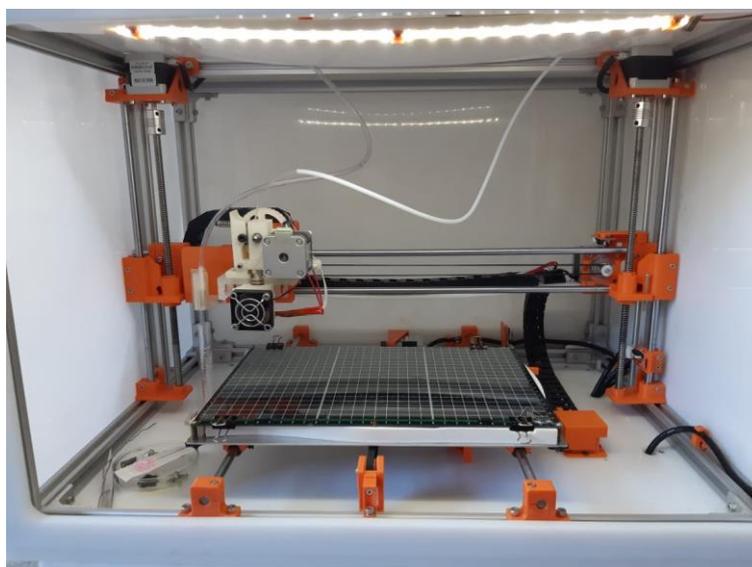
as principais características dos sistemas microfluídicos a menor quantidade de reagentes e amostras; tempo de reações menores; baixo custo de fabricação; área superficial elevada em relação ao volume ( $10000 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ ) e elevada transferência de massa e calor (Fogler, 2006; Whitesides, 2006), sendo suas aplicações desde sistemas biológicos, microsensores, microrreatores a microtrocaadores de calor (Cardoso et al., 2017; Santana et al., 2017, Santana et al., 2016). A obtenção de altas conversões e seletividade em curtos tempos de residência nesses microsistemas possibilitam tornar os processos mais eficientes, resultando na criação de produtos e métodos de produção de forma mais rápida para a indústria.

Para buscar otimizar a produção de microdispositivos, ultimamente tem sido proposto o uso de impressoras 3D para a fabricação desses, uma vez que a impressão 3D oferece a vantagem da cadeia de processo simplificada e a possibilidade de fabricar sistemas complexos de vários níveis (Lee et al., 2016). A utilização dessas impressoras pode impulsionar o desenvolvimento de novos produtos e processos aplicando a Microfluídica, pois espera-se que o processo de fabricação de micro e milid dispositivos possa ser realizado em qualquer laboratório, indústria ou mesmo em locais remotos, pois dispensará a utilização de salas limpas e pessoal com elevado grau de experiências nas técnicas convencionais de fabricação.

Diante do exposto acima, esse trabalho teve como objetivo principal, desenvolver um conjunto de instruções para um sistema robótico, capaz de realizar ensaios experimentais em microdispositivos de forma totalmente autônoma.

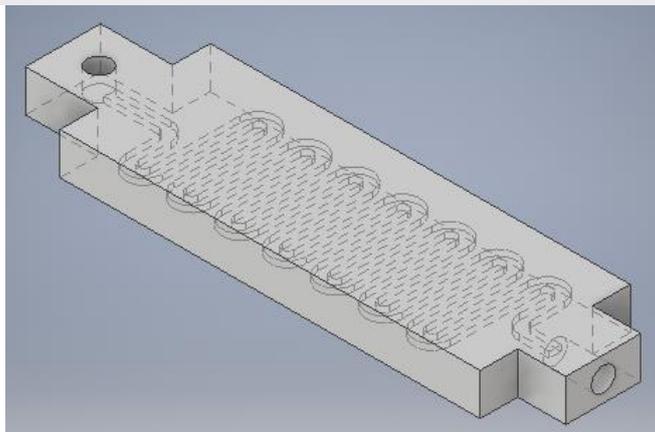
### Materiais e Métodos

O equipamento utilizado como o sistema robótico a ser controlado foi a impressora 3D apresentada na Figura 1, fruto de um projeto do grupo de pesquisa com a startup 3D *BiotechnologiesSolutions* (São Paulo, Brasil). A escolha por esta se deveu ao fato de ser uma impressora de dupla extrusão (dois bicos diferente para extrusão de materiais), sendo um voltado para a impressão do material polimérico que constitui o microrreator, e o outro associado a uma bomba seringa, controlada pelo equipamento, voltada para extrusão de líquidos. Assim, é o equipamento ideal para o controle autônomo de todo o processo, desde a impressão do microrreator, até a realização da reação em si, bombeando os reagentes.



**Figura 1.** Impressora 3D com dupla extrusão para deposição de filamento fundido e deposição controlada de fluidos.

Para o desenvolvimento do projeto, foi necessário adaptar o design do microrreator para que fosse possível a realização de experimentos que o equipamento atuasse de forma totalmente autônoma: tradicionalmente, os microrreatores utilizados pelo grupo de pesquisa apresentam bocais de entrada e saída dispostos na horizontal, entretanto, dado que o bico extrusor do equipamento utilizado para deposição dos reagentes é disposto na vertical, era necessário um modelo alternativo em que o bocal de entrada fosse adaptado para tal circunstância. Assim, utilizando o software *Autodesk Inventor*, foi feito o modelo digital piloto do microrreator para os experimentos, apresentado na Figura 1.

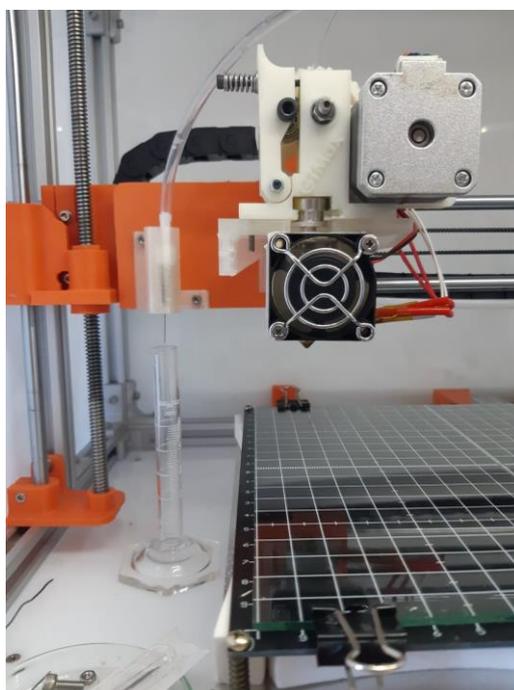


**Figura 1.** Modelo digital, com canais internos representados pelas linhas pontilhadas

Já para o controle da impressora 3D em si, utiliza-se a linguagem de programação Código G (ou G-Code), a qual, devido a sua simplicidade, pode ser lida e desenvolvida em um programa de blocos de notas comum nos computadores, não requisitando nenhuma plataforma específica para desenvolvimento dos códigos. Para aprofundamento do estudo da linguagem e seus comandos, foi consultada constantemente a plataforma oficial e colaborativa do *Marlin*, um dos principais e mais difundidos firmwares de impressoras 3D, presente no equipamento utilizado neste projeto.

### Resultados e Discussão

Devido a sua praticidade quanto a montagem experimental, os testes para calibração da vazão foram os primeiros a serem realizados, consistindo basicamente na extrusão do líquido pela bomba seringa, controlado pelo sistema, em uma proveta graduada, sendo o tempo de extrusão medido por cronômetro (Figura 2).



**Figura 2.** Montagem Experimental para realização da curva de calibração de vazão.

Entretanto, ao realizar o primeiro experimento, um problema foi constatado que inviabilizava a coleta de dados: ao realizar a extrusão com seu comando básico, o equipamento expelia todo o líquido em uma velocidade extremamente rápida, demorando apenas alguns décimos de segundo, sendo impossível cronometrar o tempo de extrusão. Assim, foi necessário interromper os testes e voltar ao estudo da



linguagem e do equipamento, para entender ao motivo deste comportamento da impressora, e buscar como contornar tal problemática.

Logo, o foco de estudo deste projeto se voltou para entender a problemática da extrusão mencionada anteriormente, prever possíveis problemas que possam ocorrer nos testes de calibração e nos experimentos de reações, desenvolver códigos e soluções para tais problemas previstos e planejar os procedimentos para os testes assim que possível retomar o uso da impressora. Para o motivo do problema na extrusão, após estudar mais sobre o firmware *Marlin*, presente no equipamento e responsável pela leitura dos códigos em G-Code, e sobre o funcionamento do impressoras 3D, concluiu-se que a explicação para tal problemática é de que o software destes equipamentos são programados para que seus movimentos sejam sempre com as maiores velocidades permitidas pelo software e/ou o comando do código, sendo tal regra imposta também à extrusão. Ou seja, a velocidade máxima de extrusão do fluido, por ser muito alta, é quem causa o fenômeno observado que inviabilizou os testes em um primeiro momento. Para solucionar tal problema foi desenvolvido o código exposto na Figura 3a.

O comando básico de extrusão, que utilizado sozinho ocasiona na problemática descrita, é o comando “G1”, que consiste em informar ao sistema sobre movimentações em qualquer eixo, sendo o de interesse o eixo “E”, responsável pela extrusão. A entrada no exemplo é “E2.0”, dada em milímetros, sendo processada pelo sistema que este extrusar 2 mm de líquido, que significa empurrar em 2 mm o êmbolo da bomba seringa. Porém, como já explicado, este comando sozinho acarreta em uma deposição muito rápida do líquido, algo não desejado, requerendo o uso de um segundo comando, a solução encontrada para o problema: “M203”.

```

T1
M104 S175 ;aquecimento do bico

G21 ;metric values
G90 ;absolute positioning
M82 ;set extruder to absolute mode
M107 ;start with the fan off

G92 Z0
G1 Z10 F80
G28 X0 Y0 ;move X/Y to min endstops
G28 Z0 ;move Z to min endstops
G1 Z45.0 F90 ;move the platform down 15mm
G1 X150 F2000
G92 E0 ;zero the extruded length

;"Seta" o máximo de taxa de extrusão
M203 E5.0 ;Extrusão máxima de 5 mm/s

;Realiza a deposição

G0 F4200 X0 Y150 Z45.0
G1 F500 X0 Y150 Z45.0 E2.0 ;Testa extrusão de 2 mm

;fim da deposicao

```

(a)

```

T0
G21 ;metric values
G90 ;absolute positioning
M82 ;set extruder to absolute mode
M107 ;start with the fan off

;Put heatign message on LCD screen
M117 Heating to 30...

;Set Point da temperatura da mesa de 30°C
M140 S30
M190 S30

;Espera 10 minutos para prosseguir no código
G4 S600

;FIM DO TESTE
;FIM DO CODIGO

```

(b)

**Figura 3.** Código desenvolvido em G-Code utilizado nos testes para calibração da vazão (a) e da temperatura (b)

Este comando atua diretamente no firmware *Marlin*, sendo sua única entrada a nova velocidade máxima para o eixo que se deseja modificar. No caso, como a extrusão é o cerne do problema, utiliza-se a entrada “E5.0”, ou seja, a nova velocidade máxima informada pelo comando é referente à extrusão, sendo de 5 mm/s, unidade processada pelo equipamento.

Também fora desenvolvido previamente o código para calibração da temperatura (Figura 3b), baseando-se no esquema experimental com sensores e um sistema próprio associado (Santana et al., 2017). Os comandos “M140” e “M190” são referentes ao set point fornecido ao sistema para a temperatura da mesa, sendo utilizados em conjunto apenas para acelerar o processo. O primeiro código proporciona um aumento acelerado do aquecimento da mesa, e o segundo indica ao sistema que este deve esperar a temperatura atingir a desejada para que o restante do código seja processado. Ambos comandos fornecem o valor de temperatura de interesse como entrada, podendo ser usados sozinhos, porém o uso



conjunto acelera e melhor controla o processo. A entrada fornecida no código é lida em Celsius, sendo, no exemplo da Figura 3b, correspondente à 30° C ("S30").

Já o comando "G4" é referente ao tempo de residência, fornecendo ao sistema uma entrada correspondente ao período de tempo em que a leitura do código deve ser pausada e permanecer em stand-by, mantendo as condições operacionais, como a temperatura, por exemplo, mas que o equipamento não realiza nenhuma ação. Sua entrada é fornecida em segundos, por isso o exemplo da Figura 3b, correspondente a um tempo de 10 minutos, contém uma entrada de 600 segundos ("S600"). É importante ressaltar que este comando é necessário apenas nos testes em que o sensor é utilizado diretamente na mesa ou no caso sem escoamento dentro do microrreator, uma vez que na presença de escoamento, a própria vazão atuará no tempo de residência.

## Conclusão

Esse trabalho teve como objetivo principal, desenvolver um conjunto de instruções para um sistema robótico, capaz de realizar ensaios experimentais em microdispositivos de forma totalmente autônoma. Assim, dado os dois códigos apresentados separadamente para os testes de calibração da vazão e da temperatura, foi possível desenvolver um código piloto para aplicação nos experimentos. Como não fora feito ainda as calibrações, os comandos seguem sem uma identificação clara da conversão das entradas aos valores reais observados, porém estes estarão explícitos através de comentários nos códigos finais.

## Agradecimentos

O desenvolvimento deste projeto se deve ao apoio da CNPq que viabilizou o projeto.

## Referências bibliográficas

CARDOSO, S.; LEITAO, D. C.; DIAS, T. M.; VALADEIRO, J.; SILVA, M. D.; CHICHARO, A.; SILVEIRO, V.; GASPAR, J.; FREITAS, P. P. Challenges and Trends in Magnetic Sensor Integration with Microfluidics for Biomedical Applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50, 2017.

DILBEROGLU, U. M.; GHAREHPAPAGH, B.; YAMAN, U. DOLEN, M. The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, v. 11, p. 545-554, 2017.

DUROS, V.; GRIZOU, J.; XUAN, W.; HOSNI, Z.; LONG, DE-L.; MIRAS, H. CRONIN, L. Human versus Robots in the Discovery and Crystallization of Gigantic Polyoxometalates. *Angewandte Chemie International Edition*, v. 56, p. 10815-10820. 2017.

FOGLER, H. S. *Elements of chemical reaction engineering*. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall PTR, 2006.

LEE, J. M.; ZHANG, M.; YEONG, W. Y.; Characterization and evaluation of 3D printed microfluidic chip for cell processing. *Microfluidic and Nanofluidic*, v. 20, 2016.

LO, R. C. Application of Microfluidics in Chemical Engineering. *Chemical Engineering & Process Techniques*, v. 1: 1002, 2013.

PEPLOW, M. Organic synthesis: The robo-chemist. *Nature*, v. 515, p. 20-22, 2014.

ROJKO, A. Industry 4.0 Concept: Background and Overview. *Internacional Journal of Interactive Mobile Technologies*, v. 11, p. 77-90, 2017.

SANTANA, H. S.; RODRIGUES, A. C.; LOPES, M. G. M.; RUSSO, F. N.; SILVA JR., J. L.; TARANTO, O. P. 3D printed millireactors for process intensification. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2019b, <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.12.013>.

SANTANA, H. S.; SANCHEZ, G. B.; TARANTO, O. P. Evaporation of Excess Alcohol in Biodiesel in a Microchannel Heat Exchanger with Peltier Module. *Chemical Engineering Research & Design*, v. 124, p. 20-28, 2017.

SANTANA, H. S.; TORTOLA, D. S.; REIS, E. M.; SILVA, J. L.; TARANTO, O. P. Transesterification Reaction of Sunflower Oil and Etanol for Biodiesel Synthesis in Microchannel Reactor: Experimental and Simulation Studies. *Chemical Engineering Journal*, v. 302, p. 752-62, 2016.

STEINER, S.; WOLF, J.; GLATZEL, S.; ANDREOU, A.; GRANDA, J. M.; KEENAN, G.; HINKLEY, T.; ARAGON-CAMARASA, G.; KITSON, P. J.; ANGELONE, D.; CRONIN, L. Organic synthesis in a modular robotic system driven by a chemical programming language. *Science*, v. 363, 2019.

WHITESIDES, G. M. The origins and the future of microfluidics. *Nature*, v. 442, p. 368-373, 2006.