



## **AUTOMAÇÃO DE FORNO ELÉTRICO PARA A DEPOSIÇÃO DE FILMES FINOS PELA TÉCNICA DE SPRAY-PIRÓLISE**

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2022.3832

Daniel Alves Bezerra - danielalvesb6@gmail.com  
Universidade Federal do Ceará

Ana Fabíola Leite Almeida - anafabiola@ufc.br  
Universidade Federal do Ceará

Francisco Nivaldo Aguiar Freire - nivaldo@ufc.br  
Universidade Federal do Ceará

PAULO HERBERT FRANÇA MAIA JUNIOR - phfmj2010@gmail.com  
Faculdade CEPEP

Lucas de Almada Torres - lucas\_f\_almada@hotmail.com  
UFC

**Resumo:** A forte presença da automação nos processos industriais traz uma oportunidade de aprimorar e otimizar processos de fabricação tradicionalmente manuais, mais especificamente os laboratoriais. Por meio de equipamentos que executem tarefas preordenadas e repetitivas é possível reduzir a ocorrência de erros humanos e contribuir para a segurança dos operadores, evitando o contato deles com produtos nocivos à saúde. Atualmente existem pesquisas para o desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos mais baratos, entre elas, a célula de Grätzel, conhecida também como célula solar fotoquímica, ou célula solar nanocristalina sensibilizada por corante (CSNS). Elas são fabricadas por meio de um processo realizado de forma tradicionalmente manual, conhecido como spray-pirólise. A proposta deste trabalho é realizar a automação desse processo de spray de forma que os movimentos repetitivos realizados pelo operador manual sejam feitos por um braço robótico pré-programado. Inicialmente foi escolhida uma configuração de braço robótico e as suas características, sendo selecionado o do tipo articulado. Foi desenvolvido um código de programação na plataforma Arduino para permitir o controle do braço por meio de um smartphone. O braço foi modelado em um software de simulação 3d e as suas partes foram fabricadas por meio de impressão 3d. Após a fabricação, foi realizada sua montagem e espera-se instalar o braço em uma câmara de aquecimento utilizada no processo de spray pirólise para produção de placas fotovoltaicas.





**Palavras-chave:** automação; energia solar; spray-pirólise; braço robótico



## AUTOMAÇÃO DE FORNO ELÉTRICO PARA A DEPOSIÇÃO DE FILMES FINOS PELA TÉCNICA DE SPRAY-PIRÓLISE

### 1 INTRODUÇÃO

Com o advento da indústria 4.0, a automação nos processos de fabricação tem chamado atenção ao redor do mundo. O desenvolvimento de tecnologias como Internet das Coisas, Big Data e Computação em Nuvem estão transformando a indústria de manufatura tradicional em um ambiente integrado, conectado e inteligente (CULOT et al., 2019). A manufatura inteligente pode atender à demanda do mercado de produção personalizada e promove a reorganização e atualização do processo das linhas de produção, podendo suprir requisitos mais elevados, eficiência energética e confiabilidade do sistema de produção.

Dentro desse contexto, braços robóticos de aplicação industrial têm sido convencionalmente usados em processos que requerem trabalho manual pesado (como a indústria de manufatura) para realizar operações simples e repetitivas. Eles também podem ser utilizados na fabricação de vários produtos nas indústrias elétrica, eletrônica, alimentícia e química. Para o desenvolvimento desses sistemas procuram-se projetos de menor peso (DRISCOLL, 1974), pois permitem um alto nível de segurança devido ao impacto reduzido em uma colisão potencial com um humano ou um obstáculo. Outros motivadores para designs leves incluem aumento da velocidade operacional, custo reduzido e consumo de energia reduzido, o que se torna cada vez mais importante com mais robôs móveis operados por bateria. Dessa forma procura-se um equilíbrio entre baixa massa e robustez (THOMSEN et al., 2021).

Dentre os processos que são realizados com movimentos simples e repetitivos, existem aqueles que envolvem a aspersão de fluidos sobre um substrato (placas, por exemplo), que precisam de um movimento uniforme em direção e velocidade. Esse tipo de processo, quando realizado de forma manual, está mais vulnerável a erros por parte do operador. Nesse sentido, se torna desejável encontrar métodos de automação desses processos de manufatura que sejam de fácil implementação, de baixo custo e que possuam uma interface amigável para o operador.

Para o desenvolvimento desses tipos de mecanismos, são necessárias plataformas de controle de hardware para que as funções possam ser executadas. Essas plataformas costumavam ser complexas e caras, exigindo um alto nível de especialização do programador, até o surgimento de plataformas abertas como o Arduino, que são sistemas eletrônicos de código aberto e gratuitos (MCROBERTS, 2015). Logo tornou-se mais simples para pesquisadores de universidades e desenvolvedores criarem sistemas de automação de forma mais barata e de fácil acesso.

Emissões de carbono causadas por combustíveis fósseis como petróleo, carvão e produtos de gás atingiram altos índices nas últimas décadas, o que pode causar problemas ambientais, econômicos e até sociais em todo o mundo. Nesse contexto, as fontes energéticas renováveis surgem como uma alternativa para mitigar os efeitos negativos do desenvolvimento industrial global (GÜNEY, 2022). Em destaque, a energia solar, que é gratuita e inesgotável, e já amplamente utilizada para geração de calor e eletricidade, sendo que não produz a poluição ambiental causada por outras fontes de energia, e é uma fonte de energia ecologicamente correta, limpa e altamente confiável (YUANINGSIH; ADJENG MARIANA FEBRIANTI; KAMRAN, 2020).





De acordo com projeções (IRENA. GLOBAL RENEWABLES OUTLOOK, 2020) dada a crescente redução de custos das tecnologias de energia renovável, a energia solar aumentará sua participação na geração de energia em mais de dez vezes até 2050 em relação a 2017. Assim, até 2050, um quarto da demanda global de eletricidade pode ser atendido por energia solar.

A tecnologia atual de dispositivos semicondutores permite a utilização da energia solar para a geração de energia elétrica, o que ajuda a reduzir a poluição ambiental. As células solares de filme fino, em particular, têm sido amplamente estudadas e utilizadas (HOFFMANN; PELLKOFER, 2012). Elas são fabricadas por meio de um procedimento de deposição de uma ou várias camadas finas de material com propriedades fotovoltaicas sobre um substrato.

Dentre os tipos de células solares de filmes finos, existem as células solares sensibilizadas por corante, também conhecidas como células de Grätzel (O'REGAN; GRÄTZEL, 1991). Elas utilizam um corante, como o dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), que inicia o processo de geração de eletricidade, podendo atingir uma eficiência entre 7 e 12%.

Logo, para o desenvolvimento de tecnologias como as de células solares de filmes finos, torna-se necessário o investimento e pesquisa em formas de tornar o processo de fabricação mais barato, confiável, e que produza menos erros no produto final. Dessa forma, o presente trabalho apresenta uma proposta de automação de uma câmara de aquecimento utilizada para a deposição de filmes finos sobre um substrato com a técnica de spray-pirólise por meio de um braço robótico.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Propõe-se a automatização do movimento da pistola aerográfica, equipamento utilizado na pulverização de líquidos por meio de uma fonte de ar comprimido, para tornar o processo de fabricação de placas solares de filmes finos mais versátil e eliminar possíveis erros do operador. A Figura 1 mostra a pistola utilizada no presente projeto.

Figura 1 – Pistola aerográfica utilizada no projeto



Fonte: Autoria própria

Dentre as opções disponíveis para dispositivos atuadores mecânicos para realizar um movimento pré-programado com o aerógrafo, foi escolhido o braço mecânico por sua instalação mais simples e facilidade de manutenção e obtenção de peças. Além disso, essa tecnologia eleva a qualidade e a produtividade dos processos de fabricação, uma vez que o braço robótico é capaz de manter a sua capacidade de produção por dias continuamente. O sistema de processamento e controle do braço é o microcontrolador Arduino Mega, que utiliza uma plataforma de desenvolvimento de acesso público e gratuito para programadores e pesquisadores. Se comparado com microcontroladores tradicionais, um





sistema Arduino é econômico, de fácil desenvolvimento e utilização e conveniente para compilação de algoritmos. Essa placa é responsável por receber os comandos do operador, processá-los e executá-los.

A câmara de aquecimento utilizada para a deposição dos filmes finos é mostrada na Figura 2. A câmara de aquecimento do forno foi projetada com metalon 20x20 galvanizado, fechamento interno em chapas de aço inox com 1,5 mm de espessuras, chapa externa galvanizada e entre chapas lâ de vidro. Essa câmara já é utilizada em processos manuais de deposição de filmes finos, sendo a adequada para o projeto de automação desse processo.

Figura 2 - Câmara de aquecimento para a fabricação de lacas solares de filmes finos.

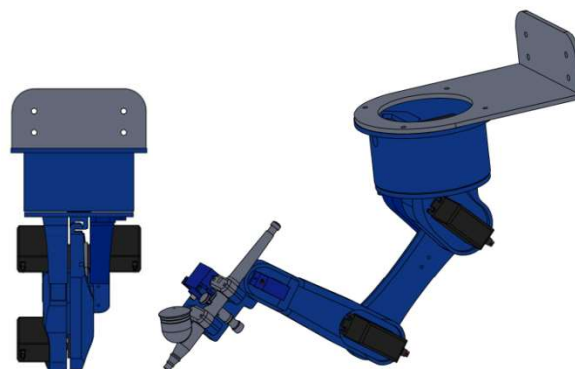


Fonte: Autoria própria

## 2.1 Modelagem e fabricação do braço

Para a fabricação do braço robótico, foi criada uma modelagem tridimensional utilizando o software Solidworks. Por meio de uma extensa busca por análises e comparações entre diferentes configurações de braços, foi escolhido o do tipo articulado, que se assemelha a um braço humano, apoiado sobre uma base giratória que possuem articulações semelhantes a um ombro e um cotovelo, sendo do tipo mais comum de braço utilizado. O braço articulado possui flexibilidade para aplicações que requerem pouco espaço, sendo de mais fácil customização. Na Figura 3 observa-se a configuração e geometria do braço em duas vistas distintas.

Figura 3 - Modelagem tridimensional do braço mecânico articulado.



Fonte: Autoria própria





Para o presente projeto foram escolhidos atuadores elétricos do tipo Servomotor, por sua alta precisão nos movimentos. Esse tipo de atuador exerce um movimento rotativo ou linear que permite o controle preciso de sua posição, angular ou linear, velocidade e aceleração. Ele também precisa de um controlador para informar a posição desejada e o torque necessário. O sistema desenvolvido realiza um movimento programado por meio de sete motores servos, dos quais quatro deles são do tipo mg995, que possuem maior capacidade de carga e os demais são do tipo sg90. Na Figura 4 é mostrada a montagem esperada do braço robótico na câmara de aquecimento.

Dentre os motores, o primeiro tem a função de girar a base de sustentação do braço, permitindo a sua movimentação no plano horizontal. O segundo e terceiro braço cumprem a função de "ombro", na qual, em conjunto realizam o movimento na posição vertical. A utilização de dois motores nessa posição está baseada no fato de o torque produzido pelo movimento do conjunto completo é máximo nela. Em seguida, há dois motores que cumprem a função de cotovelo e pulso, respectivamente, na articulação do braço. Por fim, há o motor responsável por acionar a pistola aerográfica para realizar o processo de deposição da solução de  $\text{TiO}_2$  sobre o substrato.

Figura 4 - Simulação do local de instalação do braço robótico na câmara de aquecimento.



Fonte: Autoria própria

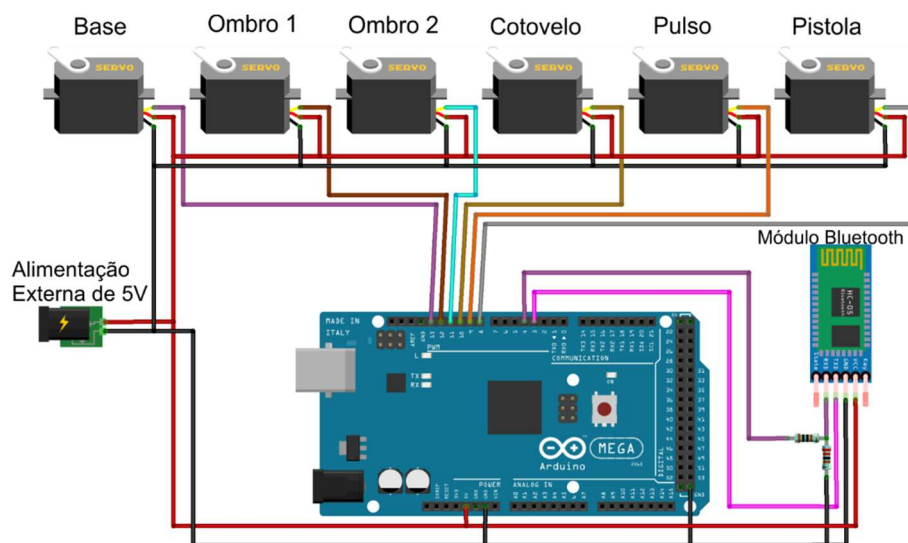
## 2.2 Sistema eletrônico

O sistema eletrônico consiste em conectar os motores do tipo Servo ao Arduino Mega, que ficará responsável por controlar o movimento dos motores que será definido pelo usuário operador. Cada motor fica conectado a sua respectiva porta, por onde será controlado. O controle do braço por parte do operador será exercido por um aplicativo de *smartphone* que receberá os comandos e os envia para um módulo receptor bluetooth, e em seguida para o Arduino para serem computados. Será possível controlar o braço em tempo real, ou gravar um movimento para que seja repetido. O esquemático eletrônico pode ser visto na Figura 5.





Figura 5 - Esquema eletrônico do braço robótico (Autoria própria).



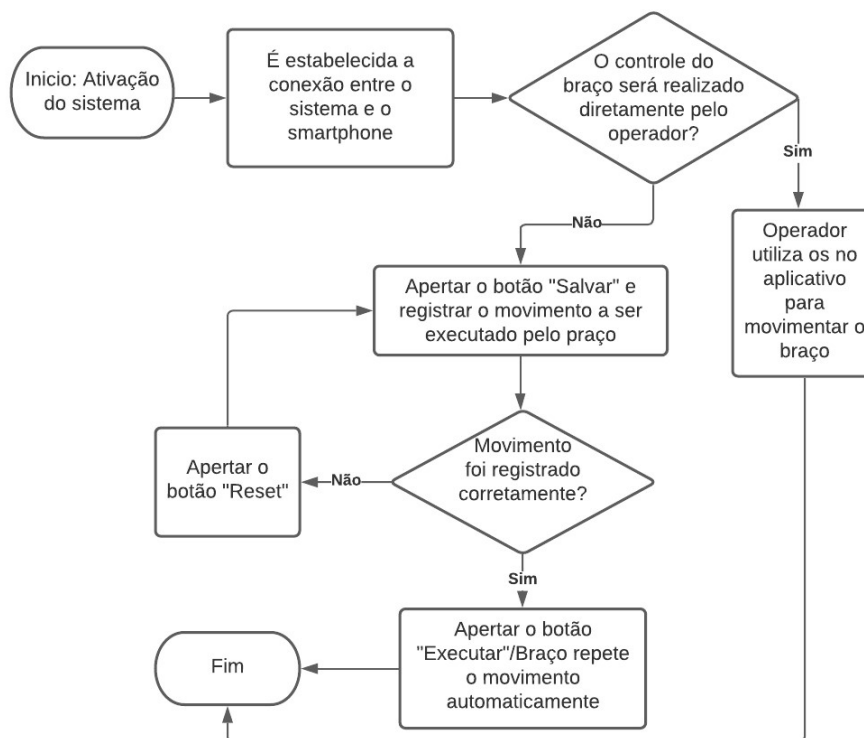
Fonte: Autoria própria

Foi desenvolvida uma interface com que o operador pode controlar ou programar um movimento para o braço exercer de forma repetida e contínua. Essa interface está na forma de um aplicativo de *Smartphone* que criado especificamente para esse projeto utilizando a plataforma de desenvolvimento *App Inventor*. O aplicativo receberá comandos do operador e, por meio de uma conexão sem fio *Bluetooth*, os enviarão para o módulo HC-05 conectado ao Arduino.

## 2.3 Programação no Arduino

O código desenvolvido e carregador para o micro controlador no Arduino Mega é uma sequência de passo e movimentos a serem realizados. Inicialmente inicializa-se os servos e o módulo Bluetooth e move-se o braço do robô para sua posição inicial. Em seguida, verifica-se constantemente se há algum dado recebido do *Smartphone*. Dependendo dos dados recebidos, é dito ao braço do robô o que fazer. A Figura 6 mostra um fluxograma com o procedimento completo a ser executado pelo código de programação.

Figura 6 - Fluxograma do procedimento a ser executado pelo código



Fonte: Autoria própria

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os componentes mecânicos do braço robótico estão sendo fabricados utilizando uma impressora 3D utilizando fibra do material plástico ABS. Esse material possui uma complexidade de manuseio maior do que a sua alternativa, o PLA, sendo necessária a mesa de impressão aquecida e, preferencialmente, a impressora fechada. Porém, suas características mecânicas, resistência mecânica e térmica, o tornam mais adequado para a presente aplicação. Concluída a fabricação, serão montadas as peças junto com os motores obtidos de forma que sejam realizados testes com o mecanismo obtido. Na Figura 7 são mostrados os componentes fabricados até o presente momento, com seus respectivos motores. Observa-se que até o presente momento, o mecanismo de suporte e de ativação do aerógrafo estão para ser fabricados e implementados.



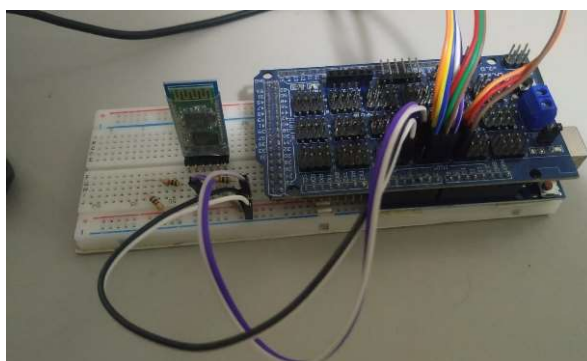
Figura 7 - Braço mecânico fabricado até o momento.



Fonte: Autoria própria

Na Figura 8 encontramos a placa controladora Arduino Mega, que está conectado aos motores e ao módulo *bluetooth*. A montagem mostrada é provisória e será substituída por uma mais robusta, de modo que garanta a segurança e qualidade do sistema.

Figura 8 - Arduino e o módulo *bluetooth*.



Fonte: Autoria própria

Para a alimentação do sistema foi obtida uma fonte chaveada de 5V e 60W para fornecer energia ao sistema completo. Ela pode ser observada na Figura 9. Em seguida será fabricado o suporte para o aerógrafo, onde será colocado ele e o motor responsável por sua ativação.

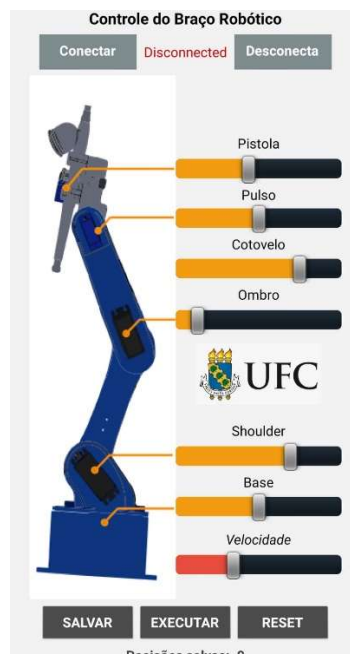
Figura 9 - Fonte de alimentação.



Fonte: Autoria própria

O aplicativo desenvolvido pode ser observado na Figura 10. Ao se apertar o botão "Conectar", há a opção de conectar o dispositivo móvel no qual está instalado ao módulo *Bluetooth* instalado no sistema. Uma vez que a conexão for realizada, o controle pode ser realizado diretamente pelo operador por meio dos botões deslizantes. O movimento desejado pelo operador pode ser registrado por meio do botão "Salvar", e ser executado repetidas vezes pelo botão "Executar".

Figura 10 - Plataforma desenvolvida para o aplicativo controlador do braço mecânico.



Fonte: Autoria própria

#### 4 CONCLUSÃO

O braço robótico desenvolvido satisfaz o objetivo inicial de fornecer uma alternativa de automatização do processo de fabricação de placas fotovoltaicas por meio do processo de spray-pirólise. Os resultados preliminares mostram que um sistema controlado por um código *Open Source*, com peças fabricadas por impressão 3D é viável em sua fabricação. Espera-se que este sistema de baixo custo e construção acessíveis possa contribuir para a difusão da automação de processos manuais que envolvam spray-pirólise.

Futuros trabalhos visam realizar testes do funcionamento do mecanismo modelado e sua instalação na câmara de fabricação de placas fotovoltaicas para desenvolver o seu funcionamento.

#### AGRADECIMENTOS

Agradeço a CAPES e a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap), pelo apoio e recursos fornecidos.

#### REFERÊNCIAS

- CULOT, G. et al. Addressing Industry 4.0 Cybersecurity Challenges. **IEEE Engineering Management Review**, v. 47, n. 3, p. 79–86, 1 jul. 2019.
- DRISCOLL, L. C. The US Industrial Robot Market. **Industrial Robot: An International Journal**, v. 1, n. 5, p. 222–224, maio 1974.
- GÜNEY, T. Solar energy, governance and CO2 emissions. **Renewable Energy**, v. 184, p. 791–798, 1 jan. 2022.
- HOFFMANN, W.; PELLKOFER, T. Thin films in photovoltaics: Technologies and perspectives. **Thin Solid Films**, v. 12, n. 520, p. 4094–4100, 2 abr. 2012.
- IRENA. GLOBAL RENEWABLES OUTLOOK. **Energy transformation 2050/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020**. [s.l: s.n.]. Disponível em: </publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>. Acesso em: 21 dez. 2021.
- MCROBERTS, M. **Arduino Básico - 2ª edição: Tudo sobre o popular microcontrolador Arduino**. [s.l: s.n.].
- O'REGAN, B.; GRÄTZEL, M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films. **Nature**, v. 353, n. 6346, p. 737–740, 1991.
- THOMSEN, D. K. et al. Vibration control of industrial robot arms by multi-mode time-varying input shaping. **Mechanism and Machine Theory**, v. 155, p. 104072, 1 jan. 2021.
- YUANINGSIH, L.; ADJENG MARIANA FEBRIANTI, R.; KAMRAN, H. W. Reducing CO2 Emissions through Biogas, Wind and Solar Energy Production: Evidence from Indonesia. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 10, n. 6, p. 684–689, 10 out. 2020.

#### INSTRUCTIONS FOR PREPARATION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS TO THE SCIENTIFIC COMMITTEE OF THE L BRAZILIAN CONGRESS ON ENGINEERING EDUCATION AND V INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EDUCATION IN ENGINEERING – COBENGE 2022

**Abstract:** *The strong presence of automation in industrial processes brings an opportunity to improve and optimize traditionally manual manufacturing processes, more specifically*





*laboratory ones. By means of equipment that performs pre-ordained and repetitive tasks, it is possible to reduce the occurrence of human errors and contribute to the safety of operators, avoiding their contact with products that are harmful to health. Currently, there are researches for the development of cheaper photovoltaic systems, among them, the Grätzel cell, also known as photochemical solar cell, or dye-sensitized nanocrystalline solar cell (CSNS). They are manufactured using a process traditionally carried out manually, known as spray-pyrolysis. The purpose of this work is to automate this spray process so that the repetitive movements performed by the manual operator are made by a pre-programmed robotic arm. Initially, a robotic arm configuration and its characteristics were chosen, with the articulated type being selected. A programming code was developed on the Arduino platform to allow control of the arm through a smartphone. The arm was modeled in a 3d simulation software and its parts were manufactured using 3d printing. After manufacturing, its assembly was carried out and it is expected to install the arm in a heating chamber used in the spray pyrolysis process for the production of photovoltaic cells.*

**Keywords:** Automation; solar energy; spray-pyrolysis; robotic arm.

