



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DANIEL ALVES BEZERRA

**PROTOTIPAGEM COM MODELAGEM E IMPRESSÃO 3D DE BRAÇO
ROBÓTICO PARA DEPOSIÇÃO DE FILMES FINOS PELA TÉCNICA DE SPRAY-
PIRÓLISE**

FORTALEZA

2023

DANIEL ALVES BEZERRA

PROTOTIPAGEM COM MODELAGEM E IMPRESSÃO 3D DE BRAÇO
ROBÓTICO PARA DEPOSIÇÃO DE FILMES FINOS PELA DE TÉCNICA SPRAY-
PIRÓLISE

Qualificação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis. Linha de Pesquisa: Energia Solar (Térmica e Fotovoltaica).

Orientadora: Profa. Dra. Ana Fabiola Leite Almeida.

Co-orientador: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- B469p Bezerra, Daniel.
Prototipagem com Modelagem e Impressão 3d de Braço Robótico para Deposição de Filmes Finos pela Técnica de Spray-Pirólise / Daniel Bezerra. – 2023.
73 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2023.
Orientação: Profa. Dra. Ana Fabiola Leite Almeida.
Coorientação: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire.
1. automação. 2. spray-pirólise. 3. protótipo. 4. braço robótico. I. Título.

CDD 620.1

DANIEL ALVES BEZERRA

PROTOTIPAGEM COM MODELAGEM E IMPRESSÃO 3D DE BRAÇO
ROBÓTICO PARA DEPOSIÇÃO DE FILMES FINOS PELA DE TÉCNICA SPRAY-
PIRÓLISE

Qualificação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis. Linha de Pesquisa: Energia Solar (Térmica e Fotovoltaica).

Orientador: Prof. Dr. Ana Fabiola Leite Almeida.

Aprovada em: 22/08/2023.

BANCA EXAMINADORA

Profª. Dra. Ana Fabiola Leite Almeida (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Marcone Lima
Centro Universitário Maurício de Nassau

Prof. Dr. Glaucionor Lima de oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A Deus, a quem eu devo tudo e quem me salvou e me sustentou nessa jornada.

A minha mãe, Mirian, meu grande amor e quem deu tudo pelos meus sonhos.

Ao meu pai, Damião, meu exemplo e herói.

À Prof^a. Ana Fabiola Leite Almeida, pela orientação.

Ao Prof. Francisco Nivaldo Aguiar Freire, pela orientação e o apoio.

Ao colega Paulo Herbert, que forneceu apoio indispensável.

A CAPES, pelo suporte financeiro

Aos demais professores da UFC que se dedicam para o desenvolvimento pessoal, intelectual e profissional dos estudantes.

Aos integrantes da banca, por disporem de seu tempo.

Aos companheiros do Mestrado, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

Ao departamento de Engenharia Mecânica, seus integrantes e em especial ao colega Valdi.

“Energia renovável é uma tecnologia provada, os preços estão baixando. O resto do mundo está indo nessa direção e é para onde deveríamos ir também.”
(BROWN, Robert)

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 executam 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 possuem alguns de seus componentes fabricados por meio de um processo realizado de forma tradicionalmente manual, conhecido como Spray-Pirólise. A proposta deste trabalho é a automação do procedimento de aspensão utilizado nesse processo de forma que os movimentos repetitivos realizados pelo operador, geralmente de forma manual, sejam feitos por um braço robótico, que pode ser controlado por um aplicativo de *smartphone* ou por meio de um dispositivo composto por potenciômetros desenvolvido para o projeto. Inicialmente foi escolhido uma configuração de braço robótico e as suas características, sendo selecionado o modelo do tipo articulado. Um código de programação foi desenvolvido na linguagem C/C++, utilizando a plataforma de prototipagem Arduino, para permitir o funcionamento do braço. As peças do protótipo foram desenvolvidas em um *software* de simulação 3d e fabricadas por meio de impressão 3d. O sistema eletrônico do braço robótico foi desenvolvido, e o sistema foi montado. Os resultados mostram que o protótipo recebe os comandos do operador e os executa repetidamente, apresentando uma variação de 6% entre os movimentos simulados e os movimentos executados quando se realiza um comando.

Palavras-chave: automação; spray-pirólise; protótipo; braço robótico.

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 perform pre-ordered 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 research 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 have some of its components manufactured through a process carried out in a traditional manual way, known as Spray-Pyrolysis.. The purpose of this work is the automation of the spraying procedure used in this process so that the repetitive movements performed by the operator, usually manually, are performed by a robotic arm, which can be controlled by a smartphone application or through a device composed of potentiometers developed for the project. Initially, a robotic arm configuration and its characteristics were chosen, and the articulated model was selected. A programming code was developed in the C/C++ language, using the Arduino prototyping platform, to allow the arm to function. The prototype parts were developed in a 3d simulation *software* and manufactured using 3d printing. The electronic system of the robotic arm was developed. The results show that the prototype receives the operator's commands and executes them repeatedly, presenting a variation of 6% between the simulated movements and the movements executed when a command is carried out.

Keywords: automation; spray-pyrolysis; prototype; robotic arm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de braços robóticos.....	19
Figura 2 – Ilustração de um microcontrolador e seus recursos.	20
Figura 3 – Variantes do Arduino. (a) Arduino Uno, (b) Arduino Due, (c) Arduino Mega (d) Arduino Nano.	23
Figura 4 – Arduino Uno.	24
Figura 5 – Arduino IDE.....	25
Figura 6 – Estrutura interna de um servomotor.	26
Figura 7 – Servomotores MG995 (a esquerda) e SG90 (a direita).	27
Figura 8 – Célula de Gratzel.....	31
Figura 9 – Esquema de formação de filmes finos.	32
Figura 10 – Representação da técnica de Spray-pirólise.	33
Figura 11 – Descrição dos processos de deposição iniciados com o aumento da temperatura do substrato.....	34
Figura 12 Aerógrafo utilizado no projeto.	34
Figura 13 – Câmara de aquecimento para a fabricação de placas solares de filmes finos.	35
Figura 14 – Modelagem tridimensional do braço mecânico articulado.	36
Figura 15 – Amplitude dos movimentos a serem exercidos pelo braço robótico a partir de suas juntas.....	37
Figura 17 – Esquema eletrônico do braço robótico.....	38
Figura 18 – Montagem do sistema eletrônico.	39
Figura 19 – Plataforma desenvolvida para o aplicativo controlador do braço mecânico.	40
Figura 20 – Esquema eletrônico do braço robótico.	41
Figura 21 – Modelagem do controlador manual.	41
Figura 22 – Sistema de controle manual com a placa e os potenciômetros.	42
Figura 23 – Braço mecânico fabricado até o momento.	44
Figura 24 – Elásticos acoplados ao mecanismo do braço.	44
Figura 25 – Fonte de alimentação.....	45
Figura 26 – Fluxograma do procedimento a ser executado pelo código.	46
Figura 27 – Ângulos de posição das juntas do braço robótico. Ombro (θ_1), Cotovelo (θ_2) e Punho (θ_3).	47
Figura 28 – Posições A e B representadas no aplicativo e no modelo tridimensional do protótipo.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes eletrônicos selecionados.	37
Tabela 2 – Especificações do protótipo do braço robótico desenvolvido.	43
Tabela 3 – Comparação de posições simuladas e reais obtidas do robô projetado	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DSSC	<i>Dye Sensitized Solar Cell</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
CPU	<i>Central Process Unit</i>
RAM	<i>Random-Access Memory</i>
ROM	<i>Read-Only Memory</i>
I/O	<i>Input/Output</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i>
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

% Porcentagem

TiO₂ Dióxido de Titânio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivos Gerais	15
2.2	Objetivos específicos	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	Introdução à Robótica	16
<i>3.1.1</i>	<i>Automatização dos processos fabricação</i>	16
<i>3.1.2</i>	<i>Braços Robóticos</i>	17
3.2	Microcontroladores	20
3.3	Arduino	21
<i>3.3.1</i>	<i>A IDE do Arduino</i>	24
3.4	Servomotor	25
3.5	Impressão 3D	27
3.6	Energias Renováveis	28
3.7	Energia Solar	28
3.8	Célula de Gratzel	30
3.9	Filmes Finos	31
3.10	Técnica de Spray Pirólise	32
<i>3.10.1</i>	<i>Aerógrafo</i>	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1	Modelagem do braço	35
4.2	Servomotores	37
4.3	Controle do braço robótico	38
<i>4.3.1</i>	<i>Controle por aplicativo</i>	38
<i>4.3.2</i>	<i>Controle por potenciômetros</i>	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43

5.1	Fabricação e construção	43
5.2	Código de programação	45
5.2.1	<i>Controle por aplicativo</i>	45
5.2.2	<i>Controle por potenciômetros</i>	46
5.3	Movimentos do mecanismo do Braço	46
6	CONCLUSÃO	49
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	50
	REFERÊNCIAS	51
	APÊNDICE A – CÓDIGO COM APLICATIVO EM FORMATO C.....	57
	APÊNDICE B – CÓDIGO SEM APLICATIVO EM FORMATO C	69

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 promover 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 projetos 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 aspensão 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. 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, 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.

As células solares sensibilizadas por corante, também conhecidas como células de Grätzel (O'REGAN; GRÄTZEL, 1991), utilizam um corante, como o dióxido de titânio (TiO_2), que inicia o processo de geração de eletricidade, podendo atingir uma eficiência entre 7 e 12%, sendo a eficiência um indicativo do quanto energia solar a célula fotovoltaica consegue transformar em energia elétrica.

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 um protótipo de braço robótico a ser utilizado para a deposição de filmes finos sobre um substrato com a técnica de spray-pirólise.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento e fabricação de um protótipo de um braço robótico articulado, utilizando a plataforma Arduino para o desenvolvimento um mecanismo que realize movimentos programados pelo operador para a deposição de uma solução sobre um substrato transparente por meio da técnica de spray pirólise.

2.2 Objetivos específicos

- Criar um modelo tridimensional de um braço robótico articulado controlado por meio de um aplicativo para *smartphone*;
- Fabricar as peças do braço robótico por meio de impressão 3D;
- Elaborar um código de programação *Wiring* baseada em C/C++ para o Arduino que servirá para o Arduino receber os dados do aplicativo, computá-los e controlar o movimento do braço;
- Elaborar um esquemático eletrônico e realizar as conexões eletrônicas do sistema;
- Realizar montagem dos componentes eletrônicos e as peças fabricadas, deixando o braço robótico pronto para funcionamento

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Introdução à Robótica

3.1.1 *Automatização dos processos fabricação*

Os processos de fabricação atuais exigem maior produtividade, melhor qualidade do produto e maior satisfação do cliente. Na quarta revolução industrial, também chamada de "Indústria 4.0", é evidente a necessidade da adoção de novas tecnologias e adaptações nos métodos de fabricação para que os fabricantes possam se adaptar rapidamente às mudanças e elevar a qualidade do produto, otimizando o uso de energia e recursos (WANG; SHIH, 2016). Logo, iniciativas internacionais têm defendido de forma colaborativa uma manufatura inteligente, caracterizada por operações que utilizem sensoriamento avançado para dar respostas rápidas às demandas cotidianas no chão de fábrica, processamento de dados e tecnologias de tomada de decisão (LU; XU; WANG, 2020).

Algumas das tecnologias fundamentais para a Indústria 4.0 são os sistemas em nuvem, realidade aumentada, simulação, Internet das Coisas e robótica, que utilizam análise de dados em tempo real e inteligência artificial (OZTEMEL; GURSEV, 2020). A Indústria 4.0 refere-se a uma ampla gama de conceitos e apresenta diversas dificuldades em relação aos requisitos para a adequação dos produtores industriais que, para implementar a manufatura inteligente, precisam promover mudanças no âmbito operacional, incluindo um aprimoramento tecnológico e capacitação da mão-de-obra que tem contato com tais tecnologias. Esses desafios são consequência do atual ambiente de mercado competitivo (ALHAMA BLANCO; ABU-DAKKA; ABDERRAHIM, 2018).

Logo, a manufatura inteligente é o resultado da redução do envolvimento humano nas operações de produção usando inteligência artificial. Por esse motivo, os robôs são amplamente utilizados na fabricação e podem ser benéficos para as operações industriais. Eles estão gradualmente sendo integrados às tarefas de trabalho para substituir os humanos, especialmente para realizar algumas tarefas repetitivas. Sensores de ambiente automatizados, braços robóticos industriais, robôs móveis com rodas e sistemas integrados são apenas algumas aplicações de robótica que modificam as configurações do ambiente de acordo com os objetivos especificados pelo usuário. O uso de robôs se expande atualmente e será ainda mais popular na indústria, introduzindo robôs mais desenvolvidos a custos mais baixos. Os robôs desempenham principalmente três papéis específicos na indústria para acelerar

processos: atuar como um dispositivo de manuseio de materiais (transporte, empilhamento etc.), funcionar como um robô colaborativo, que trabalha junto com humanos, ou agir de forma autônoma em tarefas específicas. Dessa forma, os desafios de aplicação robótica estão associados a problemas de otimização relacionados à fabricação. Logo, os estudos na área de aplicação robótica industrial têm como objetivo encontrar a melhor solução entre as possíveis de acordo com um conjunto de critérios (VAISI, 2022).

O *feedback* humano e a personalização dos projetos são importantes para a o melhor desempenho da automação de industrial, e a Indústria 4.0 simplifica ambos. Com dispositivos portáteis como *smartphones* e *tablets*, os supervisores podem direcionar as operações robóticas e monitorar possíveis problemas, dando uma reação rápida. Tais dispositivos encorajam os fabricantes a se manterem flexíveis e atualizados em um mundo de processamento acelerado, onde eles eram, até então, conectados a um computador ou sistema de dados estacionários, em que a análise dos dados era posterior ao processo. A Indústria 4.0 é um grande passo à frente no crescimento e desenvolvimento de equipamentos que já representam avanços pioneiros de produtividade e qualidade há centenas de anos. A indústria consegue se apropriar de qualquer novidade digital e aprimora a fabricação inteligente, as fábricas automatizadas e as aplicações de Internet das Coisas. O acesso à Web é aumentado para as máquinas e elas estão conectadas a todo o esquema de visualização da cadeia de produção. Os rápidos desenvolvimentos nas tecnologias de automação contribuem para o aumento da produtividade e fluxos de trabalho mais dinâmicos (FOUMANI; SMITH-MILES; GUNAWAN, 2017).

Tendo em vista as necessidades apresentadas, a automação dos diferentes processos de manufatura precisa ser flexível e produtiva para produzir produtos personalizados em massa a um custo razoável. Logo, os trabalhos repetitivos e cansativos devem, quando possível, ficar a cargo da automação, de forma que o operador esteja encarregado da coordenação e tarefas que produzem menos desgaste em sua saúde. Para a fabricação de placas solares sensibilizadas por corante o investimento em automação e tecnologia que permita o aumento no custo-benefício de sua fabricação é essencial para que essas placas tenham a sua inserção no atual ambiente industrial e competitivo.

3.1.2 Braços Robóticos

De forma geral, um Robô Industrial é definido como um dispositivo universal que é automatizado com base em um programa e pode ser reprogramado para responder com flexibilidade e competência a várias tarefas nos processos de manufatura. As aplicações industriais típicas desses robôs incluem transporte e descarga de materiais, montagem, medição etc. Atualmente, a demanda por essa tecnologia cresce e os tipos de robôs fabricados estão se tornando cada vez mais diversos, com maior precisão, maior adaptabilidade, preços mais acessíveis, maior produtividade e maior vida útil (VAISI, 2022). Enquanto isso, o braço robótico, de forma mais específica, pode ser definido como um sistema composto de uma estrutura mecânica, atuadores, efetuadores, e um mecanismo de controle, tudo isso com o propósito de exercer um movimento semelhante à morfologia de um braço humano, em que cada articulação consiste em elos ligados uns aos outros (GROOVER, 2011).

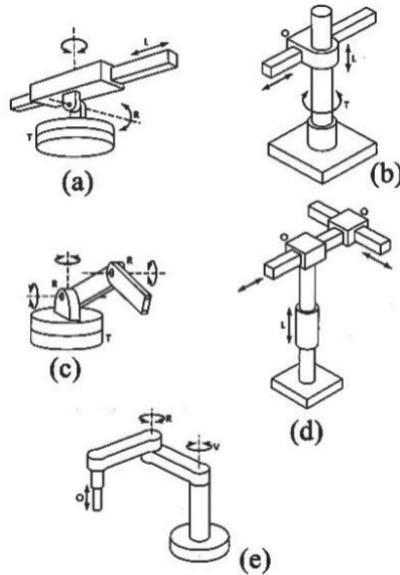
O braço robótico industrial é um dos tipos de robôs mais empregados na indústria. Na maioria dos casos, eles são programados e usados para realizar tarefas específicas, geralmente em manufatura, fabricação e aplicações industriais pesadas (ABUBAKAR *et al.*, 2022). Com um mecanismo de articulação flexível, é possível simular um punho ou até um dedo humano, podendo se deslocar ao longo de um eixo ou girar em direções específicas, permitindo aplicações em diversas áreas. Dessa forma, se torna possível segurar ferramentas de manutenção, montar, consertar e substituir microcomponentes na fábrica, bem como carregar e descarregar mercadorias de acordo com suas colocações atribuídas, entre outras tarefas de linha de produção que os braços robóticos são projetados para executar (SHAH, R.; PANDEY, 2018).

Por essas razões a utilização de braços robóticos tem ganhado espaço na indústria, chamando a atenção de fabricantes em todo o mundo. Isso ocorre porque 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 incansavelmente. Além disso, são capazes de se integrar facilmente com as demais etapas de produção na indústria, por sua capacidade de serem programados para tarefas altamente específicas.

O mecanismo de ação de um braço robótico depende da conexão entre o controlador e os motores atuadores nas juntas de movimento. Dessa forma, o controlador emite comandos para as articulações do braço para que ele possa transladar (se mover linearmente) ou girar (como em um robô articulado). Esses elos entre as juntas são montados de acordo com as especificações de produção para formar um mecanismo cinemático. A conclusão dessa cadeia de movimentos é chamada de efeito final, e seu funcionamento imita a

ação de braço humano sem falhas (YU *et al.*, 2022). Na Figura 1 estão expostos os diferentes tipos de braços robóticos.

Figura 1 – Tipos de braços robóticos.



Fonte: Groover, 2011.

Existem cinco configurações elementares de robôs (LINO, 2016):

- Polar - possui um eixo de articulação central e um braço giratório extensível;
- Cilíndricos – estes possuem uma junta rotativa que realiza um movimento de rotação ao longo do eixo da junta, enquanto a sua junta prismática se move em um movimento linear na direção vertical, geralmente operando dentro de um envelope de trabalho de formato cilíndrico;
- Articulado – se assemelha a um braço humano, está apoiado sobre uma base giratória e possuem articulações semelhantes a um ombro e um cotovelo;
- Cartesiano - possuem uma configuração retangular. e três juntas prismáticas com o objetivo de fornecer o movimento linear deslizando em seus três eixos perpendiculares (X, Y e Z);
- Scara - possuem duas juntas paralelas que fornecem conformidade em um plano onde será instalado sendo especializados em movimentos laterais.

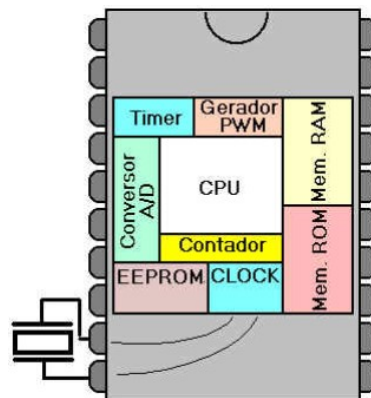
Para o presente projeto foi utilizado um braço robótico articulado, porque possui flexibilidade para aplicações que requerem pouco espaço, sendo de mais fácil customização.

Os atuadores são os “músculos” desses mecanismos, realizando o movimento das articulações com base em comandos fornecidos pela unidade de controle. Esse sistema de movimentação pode vir em três tipos: elétrico, hidráulico e pneumático (GROOVER, 2011). Para o presente projeto foram escolhidos atuadores elétricos do tipo Servomotor, por sua alta precisão nos movimentos.

3.2 Microcontroladores

Um microcontrolador é um computador pequeno condensado em um chip único. “Micro” sugere que o dispositivo é pequeno e “controlador” sugere que ele seja usado em aplicações de controle. Na maioria de suas aplicações os, microcontroladores são incorporados aos dispositivos que eles controlam, podendo ser chamados também de controladores embutidos. Um microcontrolador não se confunde com um microprocessador, existindo várias diferenças entre ambos. A principal delas é que um microprocessador requer vários outros componentes externos para sua operação. Um microcontrolador, por outro lado, possui todos os chips de suporte incorporados em seu único chip. Entre eles estão uma unidade de processamento central (CPU) que 'executa' programas, uma memória de acesso aleatório (RAM) que pode armazenar dados que são variáveis, uma memória somente leitura (ROM) onde os programas a serem executados podem ser armazenados, além de Dispositivos de entrada e saída (I/O) que permitem estabelecer comunicação com o mundo externo e alguns circuitos de apoio para controle de periféricos (CALCUTT; COWAN; PARCHIZADEH, 2004). Os recursos internos do microcontrolador são representados na Figura 2 – Ilustração de um microcontrolador e seus recursos.

Figura 2 – Ilustração de um microcontrolador e seus recursos.



Fonte: Daniel Corteletti, 2006.

Ao contrário de um computador de uso geral, um microcontrolador é projetado para uma tarefa específica, controlar um sistema projetado pelo usuário. Como resultado, as peças podem ser simplificadas e reduzidas, o que reduz os custos de produção. Os microcontroladores operam com um conjunto de instruções (programação definida pelo usuário) armazenado em sua memória. Um microcontrolador busca as instruções de sua memória de programa, uma a uma, decodifica essas instruções e, em seguida, realiza as operações necessárias (IBRAHIM; IBRAHIM, 2008). Às vezes, os microcontroladores são chamados de microcontroladores embarcados, significando que fazem parte de um sistema maior de processamento de dados de algum produto ou dispositivo, chamado de sistema embarcado (Trossen Robotics [s.d.]). Seu consumo de energia é consideravelmente baixo, o que explica suas numerosas aplicações na indústria de eletrônicos, uma vez que grande parte dos projetos, com o intuito de se tornarem mais compactos, estão sendo implementados na forma de sistemas de computador embutidos. Os microcontroladores também são apreciados por sua capacidade de reutilização, custo-benefício e confiabilidade, tendo encontrado uso generalizado em residências, escritórios e ambientes de pesquisa. (TIWARI; LEE, 1998).

No caso dos ambientes pesquisa, sendo sistemas embarcados que, como mencionado anteriormente, quando em um dispositivo, realizam processamento dos dados adquiridos, além de controlar as ações e recursos desse dispositivo. Sistemas de microcontroladores como Arduino e ESP32, se destacam no cenário atual por sua linguagem de programação amigável para pesquisadores iniciantes e vasta galeria de projetos de código aberto. Para o presente trabalho foi utilizado o Arduino para o desenvolvimento do protótipo de braço robótico.

3.3 Arduino

O Arduino é uma plataforma programável de prototipagem eletrônica para programadores e pesquisadores. Essa plataforma popular integra um *software* e *hardware* abertos baseados em microcontrolador e bibliotecas de sensores de código aberto. Se comparado com sistemas de microcontroladores tradicionais, um sistema Arduino é de fácil desenvolvimento e utilização e conveniente para compilação de algoritmos (MONK, 2016). A plataforma produz placas de circuito impresso que contém um microcontrolador, como um Atmel ATmega328p ou ATmega168, e conta com este microcontrolador no desenvolvimento de protótipos e projetos. As placas de Arduino, então, conglomerados de microcontrolador e outras partes necessárias como cristal oscilador, pinos de alimentação e o *bootloader*, que é

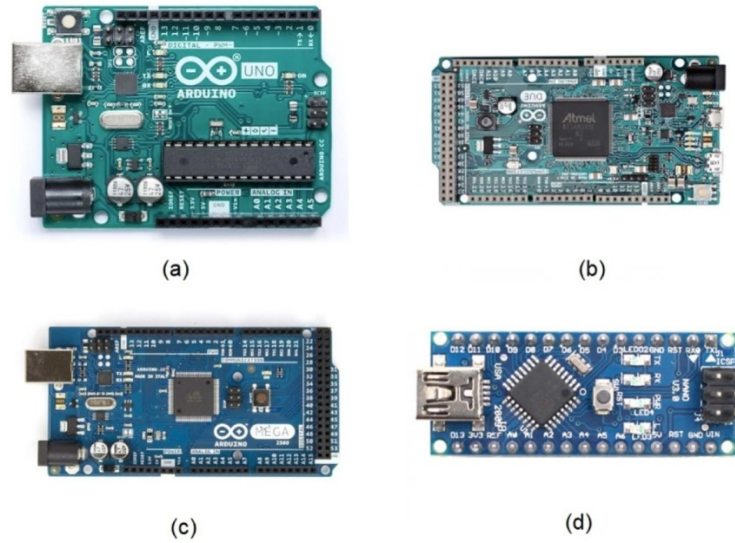
um *software* gerenciador que permite a inicialização do microcontrolador. Tudo isso é necessário para construir com sucesso programas executáveis no Arduino IDE. As placas Arduino também possuem kits baseados em microcontroladores que são úteis na construção de dispositivos digitais e entidades interativas que não apenas detectam, mas controlam objetos da vida real (KISHAN KONDAVEETI *et al.*, 2021).

Entre as áreas de aplicação do Arduino, destaca-se o controle de sistemas, que abrange os campos da robótica, engenharias mecânica e elétrica, impressão 3D, indústria, moda etc. Por meio dele, é disponibilizado um conjunto de ferramentas que tornam possível a realização de um projeto tecnológico de forma simplificada, e permitem a prática de estudos que aprimorem habilidades voltadas à lógica e à tecnologia para estudantes e pesquisadores iniciantes na área de mecatrônica e programação. Esses projetos podem ser desenvolvidos de forma que sejam conectados diretamente a um computador, enviando e recebendo dados constantemente, de acordo com a aplicação desejada, ou de forma que sejam projetos interativos independentes de conexão com computador. Ele traz diversas de aplicações, sendo possível sua utilização no controle de acionamento de motores, dispositivos luminosos, botões, interruptores, sensores, ou qualquer outro dispositivo que emita ou receba dados (QUEIROZ; SOUSA, 2018).

A plataforma Arduino é de fácil de entendimento e fácil de usar, o que a torna amigável para alguém que já tenha tido algum contato coma linguagem de programação C ou C++ simplificado. Uma de suas vantagens também é a grande comunidade de pessoas que utilizam projetos com placas Arduino, e que compartilham seus projetos na forma de códigos e diagramas de circuito para que outros programadores possam modificá-los, formando uma comunidade aberta de desenvolvedores disposta a prestar auxílio uns aos outros (MCROBERTS, 2015).

O Arduino existe em diferentes variantes, incluindo Arduino Uno, Arduino Due, Arduino Mega e Arduino Nano (Figura 3), no qual cada uma pode ser utilizada tomando como base a aplicação desejada, como o Arduino Uno sendo o modelo padrão, o Arduino Nano para projetos compactos e os Arduinos Due e Mega para projetos que necessitam de maior processamento e utilização de um maior número de dispositivos acoplados (KISHAN KONDAVEETI *et al.*, 2021).

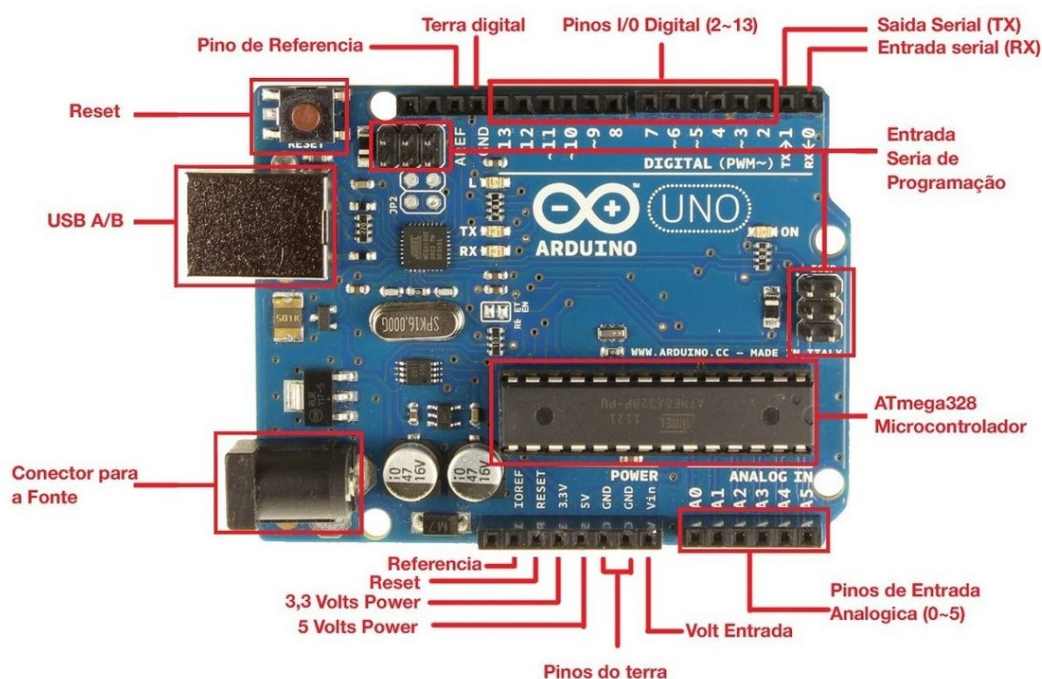
Figura 3 – Variantes do Arduino. (a) Arduino Uno, (b) Arduino Due, (c) Arduino Mega (d) Arduino Nano.



Fonte: Arduino.cc.

Entre os modelos de placas Arduino, para o presente projeto foi escolhida a do tipo Arduino Uno, mostrado na Figura 4. Essa placa contém um microcontrolador ATmega328, com 14 pinos digitais que podem ser de entrada ou saída, sendo que 15 desses pinos possuem funcionalidade de saída PWM e 6 entradas analógicas. Esse modelo de Arduino possui uma memória Flash de 32 KB, uma memória SRAM de 2 KB, com uma EEPROM de 1 KB, com um cristal oscilador de 16 MHz. Essa escolha foi realizada pelo fato de ser um sistema custo acessível e com desempenho satisfatório, possuindo portas digitais e analógicas com várias aplicações diferentes, diversas bibliotecas customizadas para as diferentes utilidades, e com uma grande comunidade de usuários na internet, que reportam erros e soluções colaborando para a melhoria da plataforma.

Figura 4 – Arduino Uno.



Fonte: Arduino.cc

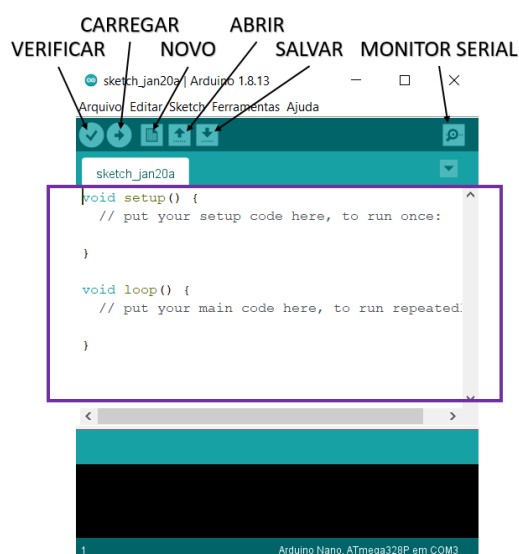
A placa pode ser alimentada pela conexão USB, que também serve para carregar o código no sistema, com uma fonte de alimentação externa, como uma bateria acoplada.

3.3.1 A IDE do Arduino

A programação do sistema a ser executado foi criado no Arduino foi realizada na interface IDE (*Integrated Development Environment*). Essa interface é gratuita e está disponível para no *site* oficial do Arduino, podendo ser utilizada nos principais sistemas operacionais. Ela representa uma das principais vantagens da plataforma, que usa uma linguagem baseada no C/C++, uma linguagem que, como mencionada anteriormente, é bastante difundida e de utilização fácil por programadores iniciantes por possuir uma estrutura simples.

A IDE, mostrada na Figura 5, possui as funções de permitir o desenvolvimento de um *software*, em seguida de enviá-lo à placa para que possa ser executado, e, por fim, de interagir com a placa Arduino.

Figura 5 – Arduino IDE



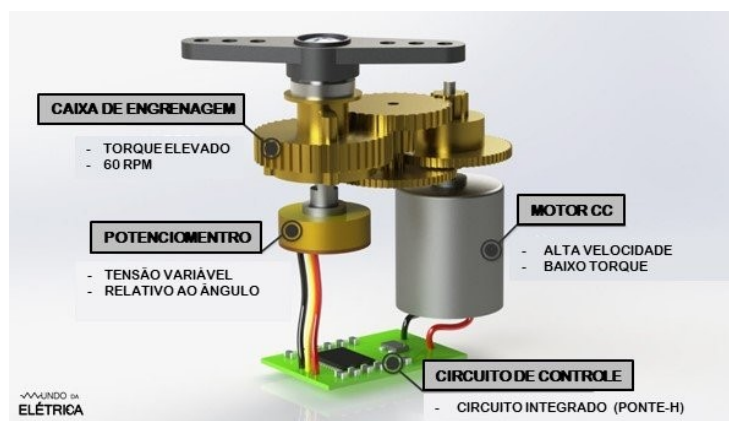
Fonte: Filipeflop, 2022.

A Figura 5 representa a IDE da plataforma Arduino. É possível observar o ambiente de desenvolvimento, que é composto de um editor de texto para escrever o programa, de uma barra de ferramentas para funções mais comuns, e de uma série de menus. Por meio dessa interface o *software* se comunica com a placa, utilizando um cabo USB, e transfere o programa para ela. O código é compilado e enviado para a placa, que passa a executá-lo.

3.4 Servomotor

Servomotor é um dispositivo eletromecânico utilizado para movimentar, com precisão, um objeto, permitindo-o girar em ângulos ou distâncias específicas. Ele possui este nome porque seu movimento de rotação não é contínuo e livre, como um motor convencional. Ele obedece a um comando de posição e torque de acordo com um procedimento determinado. Os servomotores podem ser do tipo CA (corrente alternada) ou CC (corrente contínua). Os servomotores CA normalmente são usados em ambientes industriais, onde costumam ser de elevada potência. Um servo motor CC (corrente contínua) consiste em um pequeno motor básico CC, um potenciômetro de feedback que passa a condição de seu posicionamento, uma caixa de engrenagens, e um circuito eletrônico de acionamento do motor (CRAVO EDILSON, 2019), sendo ao semelhante ao motor DC normal, porém com um controle preciso de seu movimento, como mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Estrutura interna de um servomotor.



Fonte: Henrique Mattede, [s.d.].

Um servomotor serve como um atuador que exerce movimento rotativo ou linear que permite o controle preciso de sua posição, angular ou linear, velocidade e aceleração. Ele necessita de um controlador para informar a posição desejada e o torque necessário. A principal característica do servo motor é a sua capacidade de controlar precisamente o torque que exerce. Para fazer o controle do servomotor utiliza-se um microcontrolador, que produz sinais de controle de acordo com a programação desejada e assim fornece pulsos de tensão ao motor.

Esses motores são bastante utilizados em sistemas de coordenadas, braços robóticos, drones, automação industrial, e em ramos como o aeroespacial, o agrícola, defesa e médica (CRAVO EDILSON, 2019). Os servomotores de maior qualidade possuem alta sensibilidade, mas até eles apresentam um decaimento no nível do torque à medida que a velocidade de rotação aumenta. O atrito com o ar e com os rolamentos são considerados as principais causas desse decaimento (MORETON, 2000). As plataformas Arduino possuem bibliotecas especializadas para utilização de servomotores, facilitando a sua utilização por estudantes e pesquisadores iniciantes. Exemplos de servomotores utilizados em pesquisas acadêmicas e projetos são mostrados na Figura 7.

Figura 7 – Servomotores MG995 (a esquerda) e SG90 (a direita).



Fonte: Filipeflop, [s.d.]

3.5 Impressão 3D

A impressão 3D, também conhecida como Manufatura Aditiva, é um processo de criação de objetos físicos tridimensionais a partir de modelos de computador 3D feitos em Desenhos Assistidos por Computador. A manufatura ocorre usando o processo aditivo, no qual os materiais são fundidos em camadas finas e camada após camada são depositadas (impressas) até que o objeto físico desejado seja obtido (R.ISHENGOMA; B. MTAHO, 2014). A tecnologia de impressão 3D pode ser usada para imprimir quaisquer tipos de objetos, desde protótipos de produtos até peças sobressalentes para maquinário e eletrodomésticos. Um processo aditivo pode usar vários materiais; de filamentos de plástico biodegradáveis de ácido polilático a plástico de acrilonitrila butadieno estireno e *nylon*.

A impressão 3D tem várias vantagens em comparação com outras técnicas de fabricação. É possível fabricar produtos a partir de uma peça; portanto, nenhuma montagem é necessária. Há grande liberdade de design; portanto, geometrias altamente complexas podem ser feitas. Os designs podem ser facilmente personalizados e customizados e as peças podem ser produzidas de forma barata e rápida desde a sua concepção até o produto, o que oferece a vantagem de melhorias rápidas no projeto. (TEN KATE; SMIT; BREEDVELD, 2017).

No ambiente de pesquisa, a manufatura aditiva permite o desenvolvimento de projetos de pesquisas em que se torna necessário o desenvolvimento de peças complexas e leves. Para a criação de protótipos como o de um braço robótico, a impressão 3D torna a fabricação mais rápida e acessível para pesquisadores.

3.6 Energias Renováveis

A emissão de gases de efeito estufa na realidade atual é um fator de grande relevância para o aquecimento global com efeitos negativos no meio ambiente. Logo, o CO₂ é considerado um problema global. Tendo em vista isso, a busca pela utilização de tecnologias de energia renováveis tornou-se mais crescente nos últimos anos. A expansão das energias renováveis garante segurança energética, redução dos custos de produção e diversificação do consumo de energia, reduzindo a dependência do uso de combustíveis fósseis na produção. Além disso, a disponibilidade de energia renovável acelera o comércio internacional, reduzindo os custos de produção, além de maior eficiência (QAMRUZZAMAN; JIANGUO, 2020).

A demanda de energia aumenta persistentemente com a expansão econômica e seus efeitos sobre o meio ambiente são óbvios. Os países, especialmente as nações em desenvolvimento, desejam transformar o consumo de energia com fontes alternativas, de preferência renováveis, para mitigar o efeito ambiental, bem como não interromper o ritmo de crescimento econômico (GYAMFI *et al.*, 2018).

As grandes corporações estão se tornando algumas das maiores compradoras mundiais de energia renovável (MILLER, 2020). Elas são estimuladas pela pressão de clientes, investidores, defensores da sustentabilidade e concorrentes, as empresas estão definindo metas rigorosas de energia renovável e cumprindo-as por meio de uma variedade crescente de métodos de aquisição (CHANG *et al.*, 2017). Somada à crescente demanda corporativa, também há o aumento da pressão social por responsabilidade socioambiental e a queda dos custos de energia renovável (MILLER, 2020). Pesquisas recentes sugerem que o investimento em iniciativas políticas favoráveis ao clima pode ajudar o mundo a se aproximar de um caminho de emissões líquidas zero, conforme previsto no Pacto Ecológico Europeu de 2020.

O Brasil é um país de reconhecida vocação para a produção e fornecimento de energia, com destaque para as abundantes fontes renováveis, que respondem por 48,4% de toda a energia oferecida no país e 84,8% de toda a eletricidade consumida (EPE, 2021).

3.7 Energia Solar

De todas as fontes renováveis, a energia solar é uma das que mais crescem e poderia, conseqüentemente, contribuir substancialmente para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e diminuir as emissões globais de CO₂ (CARLISLE *et al.*, 2014), desfrutando de um alto nível de aceitação geral da população e sendo aparentemente uma das mais preferíveis entre as diferentes fontes de energia renovável (SÜTTERLIN; SIEGRIST, 2017).

Para alcançar metas nacionais de energia e clima em todo o mundo, há um foco fundamental no desenvolvimento de energia solar. Diversos países têm potencial ainda não explorado para a energia solar, o que pode trazer significativos progressos para suas matrizes de energia e contribuir para as ambições de baixo carbono que assinaram sob o Acordo de Paris de 2015 (BANERJEE *et al.*, 2017; UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, 2018). Os benefícios de uma legislação voltada para o desenvolvimento dessas tecnologias são pouco explorados. A flexibilidade que leis com essa finalidade podem trazer permite que todo o potencial da energia solar seja explorado, contribuindo para o aumento do bem-estar econômico com base em reformas das matrizes energéticas dos países (HEFFRON *et al.*, 2021).

No Brasil, mesmo a região sul do país, onde os níveis de radiação solar são relativamente baixos, equivalentes aos da Amazônia equatorial, tem um potencial solar fotovoltaico significativo, maior do que o dos países europeus (MARTINS; PEREIRA; ABREU, 2007).

A energia solar fotovoltaica é considerada um dos mercados mais promissores no campo das energias renováveis para reduzir as desvantagens da queima de combustíveis fósseis, pois tem perspectivas de rápido crescimento e altos níveis de investimento já feitos (NĂSTASE *et al.*, 2018). Entre as vantagens que a energia fotovoltaica possui está o fato de uma vez instalada, sua operação não gera poluição e nenhuma emissão de gases de efeito estufa, possuindo notável custo-benefício. O silício, um de seus principais materiais utilizados em sua fabricação, tem grande disponibilidade na crosta terrestre, embora outros materiais necessários na fabricação de sistemas fotovoltaicos como a prata eventualmente limitem o crescimento da tecnologia (LO PIANO; MAYUMI, 2017).

Os sistemas fotovoltaicos, especialmente os conectados ao sistema de distribuição, oferecem diversos benefícios ao sistema elétrico, como a redução das perdas por transmissão e distribuição de energia, a redução do investimento em linhas de transmissão e distribuição e o aumento do volume de energia elétrica disponível nos horários de pico de demanda (FERREIRA *et al.*, 2018; GARLET *et al.*, 2020). Além disso, países que possuem políticas de

desenvolvimento sustentável usam a tecnologia fotovoltaica como fonte renovável competitiva, inclusive em áreas com acesso limitado ou sem eletricidade (PEREIRA DA SILVA *et al.*, 2019).

Em relação à contribuição das tecnologias fotovoltaica instaladas no Brasil, existem algumas características em relação às tecnologias monocristalina, policristalina e de filmes finos. A tecnologia de silício monocristalino tem os mais altos níveis de eficiência real, devido à sua alta eficiência nominal e ao menor impacto da temperatura no desempenho celular quando comparado ao silício policristalino. Em relação ao desempenho em condições reais, a tecnologia de filmes finos tem as menores reduções na eficiência elétrica e, portanto, corresponde à melhor tecnologia do ponto de vista da temperatura (SIMIONI; SCHAEFFER, 2019). Vale ressaltar também que tecnologias fotovoltaicas de filme fino com baixo poder e coeficiente de temperatura apresentam desempenho superior de tensão de saída. Monocristalinos e policristalinos apresentaram intensa degradação em áreas costeiras com alta temperatura e umidade relativa. Tecnologias baseadas em silício cristalino (monocristalino e silício policristalino) são as mais afetadas pelas altas temperaturas. Enquanto isso, as tecnologias fotovoltaicas menos afetadas por temperaturas extremas são as tecnologias de filmes finos (DO NASCIMENTO *et al.*, 2018).

3.8 Célula de Gratzel

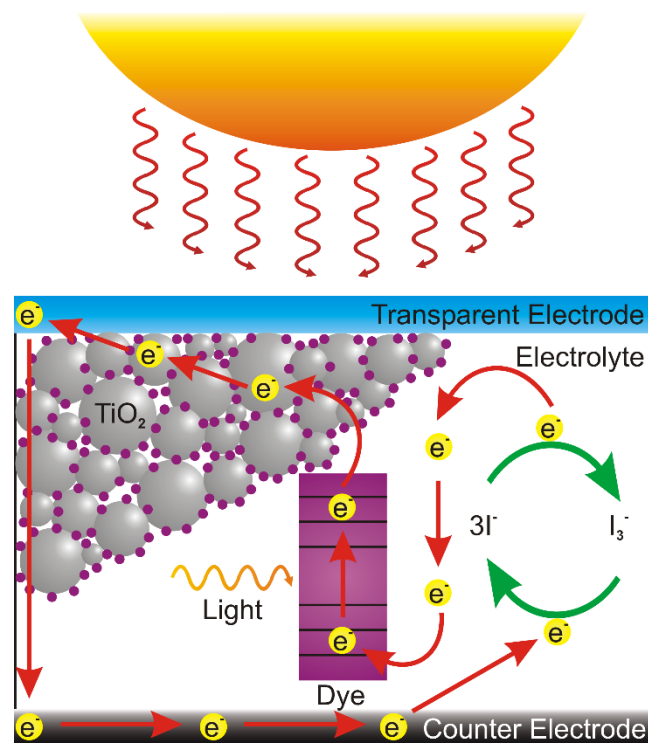
A célula solar Gratzel, também conhecida como célula solar sensibilizada por corante, da sigla em inglês DSSC, *dye-sensitized solar cell*, produz eletricidade por meio de um princípio fotoeletroquímico, que transforma a energia da luz em energia elétrica, com um propósito semelhante àquelas de silício cristalino. Elas se baseiam na utilização de um corante absorvedor de fótons capaz de transferir um elétron no estado excitado para um semicondutor, iniciando o processo que leva à geração de corrente, sendo o dióxido de titânio (TiO_2) o mais utilizado. São células solares de pertencentes ao grupo de células solares de filmes finos e a sua proposta é de ser uma célula de baixo custo cujo funcionamento estaria embasado no fenômeno da fotossíntese (O'REGAN; GRÄTZEL, 1991).

No processo de conversão na célula, a radiação produz excitação nos elétrons do corante, que passam para a banda de condução do semicondutor e produzindo buracos no corante, que rapidamente são regenerados pelos elétrons provenientes da oxidação do eletrólito. Após percorrerem um circuito externo, eles produzem corrente. Por fim, os elétrons

são direcionados ao contraeletrodo, provocando a redução do eletrólito, e completando o ciclo da célula (MAYRINCK *et al.*, [S.d.]). Na Figura 8 é apresentada a sua estrutura básica.

Este modelo oferece a perspectiva de um custo de fabricação mais baixo em comparação com os modelos tradicionais, que utilizam células solares baseadas em silício, que requerem grandes materiais de alta pureza, alto silício cristalino que são caros e para produzir. As células de Gratzel são fabricadas utilizando combinações resistentes de materiais orgânicos, facilitando o seu processamento e manuseio, sendo também bastante flexível (SHAH, A. *et al.*, 1999).

Figura 8 – Célula de Gratzel.



Fonte: (SHAH, A. *et al.*, 1999).

As células solares sensibilizadas por corante são leves e são produzidas em substratos flexíveis, sendo o vidro bastante utilizado, sendo assim, estas células possuem grande aplicação, podendo ser coloridas por conta do corante que seja utilizado. A estrutura básica de uma célula solar sensibilizada por corante é constituída por: fotoanodo (semicondutor e corante), contra eletrodo e eletrólito.

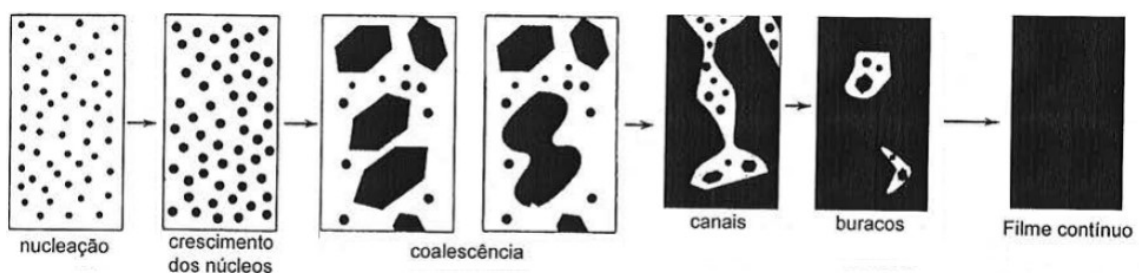
3.9 Filmes Finos

Filmes finos podem ser definidos como camadas de material que possuem espessuras que podem variar de nanômetros até micrômetros. Essas camadas são depositadas sobre um material (substrato) com o objetivo de alterar suas propriedades superficiais, podendo dar a ele diferentes propriedades químicas, ópticas, elétricas, térmicas, mecânicas e magnéticas para essa superfície. Isto faz com que a deposição de filmes finos tenha muitas aplicações em diversas áreas da ciência, tecnologia sendo utilizados em projetos de pesquisa (L. SMITH, 1995).

Nelas, existe o fornecimento de um material que irá compor o filme, que pode ser fornecido por uma fonte líquida, sólida, gás ou vapor, destacando-se que se a fonte for sólida, ela será pulverizada (L. SMITH, 1995). Os átomos ou moléculas desse material serão condensados sobre o substrato. O modo de fixação pode ocorrer por adesão química ou física. A adesão química ocorre quando há transferência de elétrons entre o material do substrato e a partícula depositada. Já a física ocorre quando as partículas se aderem de forma fraca ao substrato, sem ligações químicas (TATSCH, 2000).

Após a adesão das partículas, inicia-se o processo de nucleação, mostrado na Figura 9, no qual ocorre a formação de pequenos conglomerados de material, que são os núcleos, em diferentes regiões da superfície, os núcleos formados crescem, à medida que mais átomos chegam à superfície até o ponto em que entram em contato uns com os outros, se unindo e formando estruturas maiores, em um processo chamado de coalescência. Em seguida, canais e buracos de substrato exposto são preenchidos com novos núcleos até a formação de um filme contínuo.

Figura 9 – Esquema de formação de filmes finos.



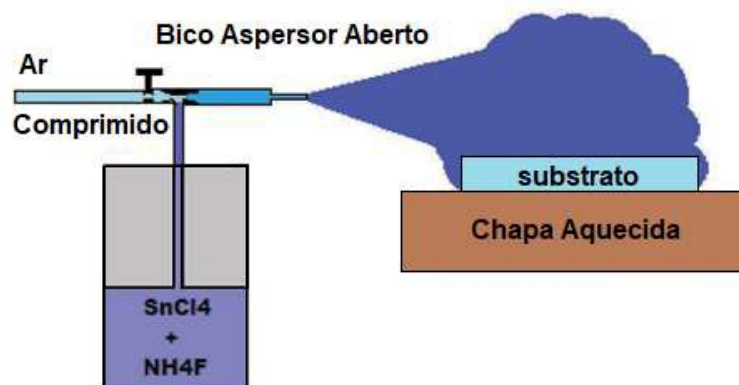
Fonte: (MENDONÇA, 2018).

3.10 Técnica de Spray Pirólise

Entre os métodos de deposição de filmes finos mais conhecidos, o utilizado no presente trabalho é o do Spray-Pirólise. Ele utiliza precursores na forma líquida, por exemplo, $TiCl_3$ ou Ti_4 , e um substrato aquecido e atomizador e se baseia na pirólise de moléculas orgânicas. Nesse processo ocorre a quebra de uma molécula como efeito da temperatura.

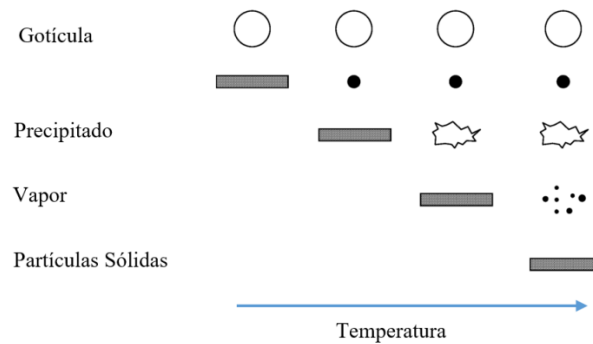
Nesse processo, a solução é atomizada em pequenas gotas e que são transferidas para o substrato aquecido devido ao gás que gera filmes finos. O aerossol de nuvem atômica gera gotículas maiores devido ao método de pulverização ultrassônica que determina as gotículas menores. Isso influencia a morfologia da superfície do material. Logo, o processo consiste basicamente na geração e transporte do aerossol, evaporação do solvente, dispersão das gotículas, secagem e decomposição das moléculas. A pirólise por spray é muito eficiente, econômica e utiliza equipamentos simples. Os filmes finos produzidos possuem grande área superficial de cobertura de substrato e potencial e homogeneidade de síntese de massa (TAHIR *et al.*, 2020). Nas Figura 10 e Figura 11 estão representados os processos de aspensão e de deposição do material respectivamente.

Figura 10 – Representação da técnica de Spray-pirólise.



Fonte: (PEREDNIS; GAUCKLER, 2005)

Figura 11 – Descrição dos processos de deposição iniciados com o aumento da temperatura do substrato.



Fonte: (PEREDNIS; GAUCKLER, 2005).

3.10.1 Aerógrafo

O aerógrafo é um equipamento para a pulverização de líquidos, por meio de uma fonte de ar comprimido, que expela a substância utilizando a diferença de pressão, em alta velocidade. Possui gatilho que permite ao usuário controlar o jato de ar e o modo de projetá-lo no local desejado, mantendo sempre um fluxo constante da mistura. Esse mecanismo de funcionamento permite maior detalhamento e qualidade no resultado do trabalho realizado. Dentre atividades profissionais possíveis a serem realizadas pelo aerógrafo estão, as artísticas, como modelismo, estilização em veículos e acessórios. Na Figura 12 é mostrado aerógrafo utilizado no presente trabalho.

Figura 12 Aerógrafo utilizado no projeto.



Fonte: Autoria Própria.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a automatização do movimento da pistola aerográfica durante o processo de aspersão de uma solução de TiO_2 ou outro material de função semelhante em um substrato para a fabricação de placas solares de filmes finos em um método conhecido como Spray-pirólise optou se por:

Dentre as possíveis configurações de mecanismos atuadores mecânicos para realizar movimentos e acionamento do aerógrafo, foi escolhido o braço mecânico, cujos movimentos são exercidos por meio de motores localizados em suas juntas. Dentre os modelos de braços, foi escolhido o do tipo articulado. O sistema de processamento e controle do braço é a placa Arduino Uno, que utiliza o microcontrolador ATmega328, responsável por receber os comandos do operador e ordenar sua execução aos motores.

Foi utilizada como referência uma câmara de aquecimento utilizada para a deposição dos filmes finos, que é mostrada na Figura 13. A câmara de aquecimento do forno foi projetada com metalon 20x20 galvanizado, com fechamento interno em chapas de aço inox com 1,5 mm de espessuras, e com chapa externa galvanizada e entre chapas lã de vidro.

Figura 13 – Câmara de aquecimento para a fabricação de placas solares de filmes finos.



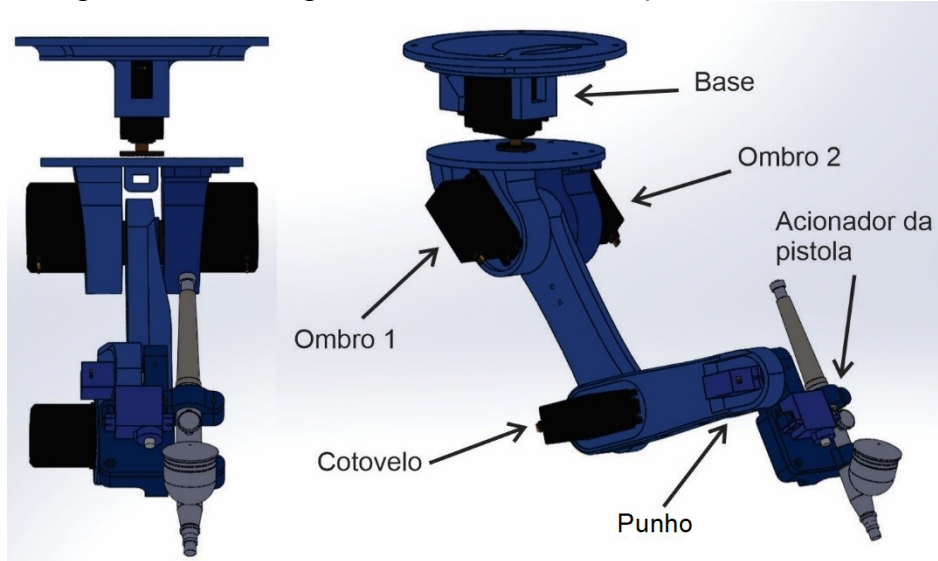
Fonte: Autoria própria.

4.1 Modelagem do braço

Para a fabricação do braço robótico, foi desenvolvida uma modelagem tridimensional utilizando o *software Solidworks*. O esquema mostrado na Figura 14 apresenta uma visão geral do robô, no qual pode-se notar o acionador da pistola e cada um dos seus eixos: Base, Ombro (composto por dois atuadores), Cotovelo e Punho. Dentre as juntas, a **Base** tem função de girar o suporte de sustentação do braço, permitindo a sua movimentação

no plano horizontal. O **Ombro** foi composto de dois atuadores mecânicos, por ser a região do robô onde há maior esforço concentrado, pois o torque produzido pelo movimento do conjunto completo é máximo nela. Em seguida, há dois motores que cumprem a função de **Cotovelo** e **Punho**, respectivamente, na articulação do braço. Por fim, o mecanismo **Acionador** da pistola aerográfica foi composto de um motor que ativa o seu gatilho para realizar o processo de deposição da solução de TiO_2 sobre o substrato. Todas as juntas e o acionador são atuadas por servomotores CC.

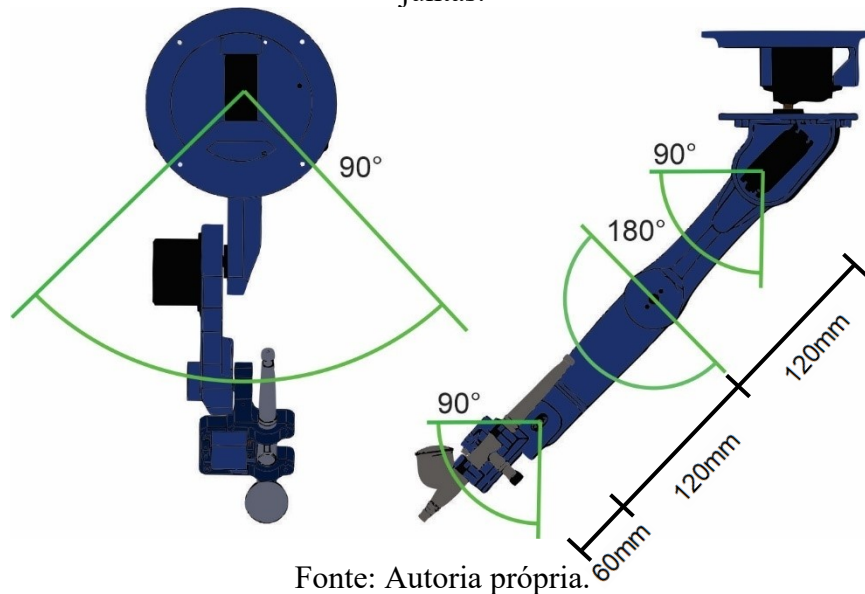
Figura 14 – Modelagem tridimensional do braço mecânico articulado.



Fonte: Autoria própria.

Em relação aos movimentos exercidos pelo braço, a Figura 15 a movimentação de cada junta, de forma que os movimentos de cada uma possuam a amplitude necessária para as tarefas a serem exercidas.

Figura 15 – Amplitude dos movimentos a serem exercidos pelo braço robótico a partir de suas juntas.



Fonte: Autoria própria.

4.2 Servomotores

O sistema desenvolvido realiza movimentos cinemáticos por meio de um conjunto de atuadores que consiste em seis motores servos, dos quais um deles é do tipo DMS15, que fica na Base. Três deles são do tipo mg995, no Ombro e Cotovelo e os demais são do tipo sg90. Foram selecionados os motores para as suas respectivas juntas no braço mecânico utilizando como parâmetros principais a tensão de alimentação, corrente máxima consumida e o torque máximo nominal suportado, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Componentes eletrônicos selecionados.

Componentes	Utilização	Especificações	Quantidade
Servomotor DMS15	Base	Tensão – 5V Corrente – 2,5A Torque – 14,5kg.cm	1
Servomotor MG996R	Ombro 1 Ombro 2 Cotovelo	Tensão – 5V Corrente – 2,4A Torque – 9,4kg.cm	3
Servomotor SG90	Punho Acionador da pistola	Tensão – 5V Corrente – 0,36A Torque – 2,5kg.cm	2
Módulo Bluetooth HC-05	Conexão do sistema com <i>Smartphone</i>	2.4 GHz Tensão – 5 V	1
Potenciômetro	Controle manual pelo operador	Resistência máxima – 19kΩ	4

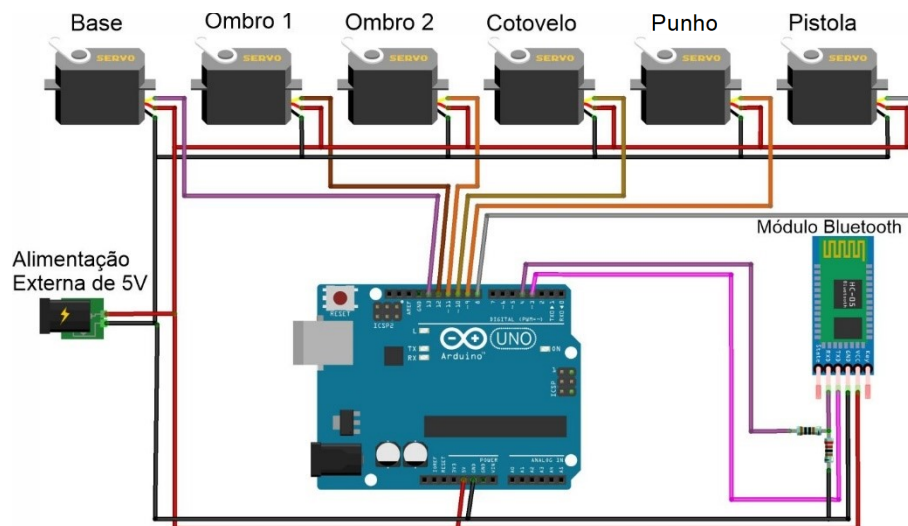
Fonte: Autoria própria.

4.3 Controle do braço robótico

4.3.1 Controle por aplicativo

O sistema eletrônico consiste em conectar os motores do tipo Servo ao Arduino Uno, 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. Duas opções de sistemas foram desenvolvidas para que o operador escolha como deseja realizar o controle do braço articulado. A primeira é mostrada na Figura 16, na qual foi desenvolvida uma interface cuja função é de 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* criado especificamente para esse projeto utilizando a plataforma de desenvolvimento *App Inventor*. O aplicativo recebe comandos do operador e, por meio de uma conexão sem fio *Bluetooth*, os enviarão para o módulo HC-05 conectado ao Arduino.

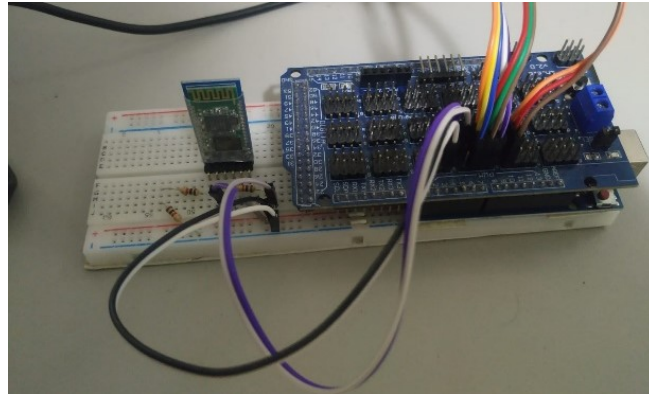
Figura 16 – Esquema eletrônico do braço robótico.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 17 encontra-se o sistema de controle montado, no qual a placa controladora Arduino Uno que está conectada aos motores e ao módulo *Bluetooth*.

Figura 17 – Montagem do sistema eletrônico.



Fonte: Autoria própria.

O aplicativo desenvolvido pode ser observado na Figura 18. Ao se apertar o botão “Conectar”, surgem as opções de dispositivos *Bluetooth* disponíveis, devendo ser escolhido aquele com o nome “HC-05”, que é o módulo *Bluetooth* instalado no sistema. Uma vez que a conexão for realizada, o operador pode controlar os movimentos do braço robótico por meio dos botões deslizantes. Ao se pressionar o botão “Salvar”, o movimento desejado pelo operador pode ser registrado por meio dos botões deslizantes, até ser pressionado o botão “Executar”, no qual o movimento registrado passa a ser executado repetidas vezes pelo braço robótico, sendo a velocidade dos movimentos executados controlada pelo botão deslizante “Velocidade”.

Figura 18 – Plataforma desenvolvida para o aplicativo controlador do braço mecânico.

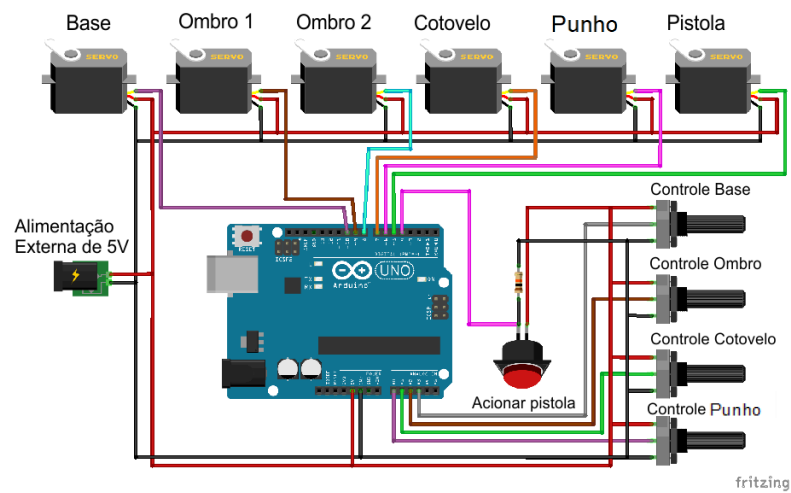


Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Controle por potenciômetros

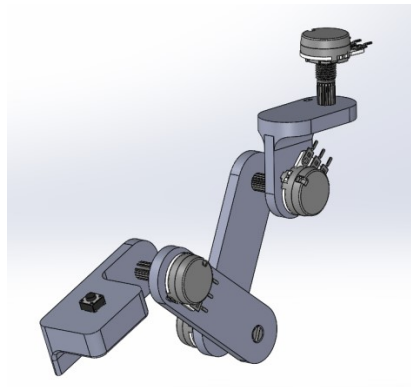
Na segunda opção de sistema de controle, mostrado na Figura 19, este será realizado por meio de um conjunto, composto de múltiplos potenciômetros e um botão acionador, desenvolvido para o presente projeto. Esse controlador foi modelado com uma geometria semelhante ao do próprio braço robótico de forma que permita que o controle de múltiplos motores seja realizado de forma direta pelo operador simulando os movimentos desejados. Esse sistema pode ser utilizado em testes e operações em que não possua acesso a um aparelho *Smartphone*, ou por preferência do próprio operador. O sistema deve ser posicionado de forma semelhante ao posicionamento do braço, de forma que ao ser movimentado pelo operador, seus movimentos sejam exercidos pelo próprio braço, e quando o operador pressionar o botão acionador, a pistola aerográfica também é acionada. Uma modelagem 3D desse controlador foi desenvolvida utilizando o *software Solidworks* e é mostrada na Figura 20.

Figura 19 – Esquema eletrônico do braço robótico.



Fonte: Autoria própria.

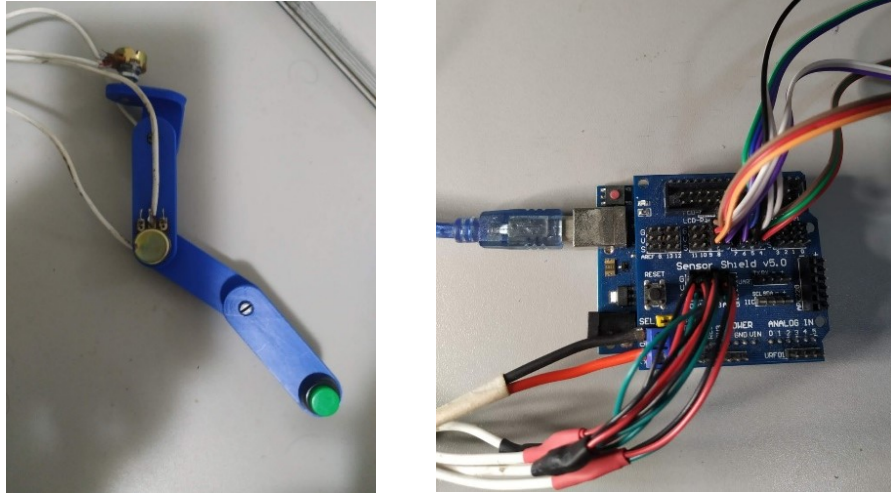
Figura 20 – Modelagem do controlador manual.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Figura 21 o segundo sistema de controle desenvolvido, no qual uma placa Arduino Uno, que está acoplada a potenciômetros posicionados de maneira que ao operador movimentá-lo, o braço realize um movimento semelhante.

Figura 21 – Sistema de controle manual com a placa e os potenciômetros.



Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, existem duas formas alternativas de controle do mecanismo desenvolvido, podendo ser possível controlar o braço em tempo real utilizando o controlador com potenciômetros, ou por meio do aplicativo de *Smartphone*. O aplicativo também permite que o operador registre um movimento determinado para ser continuamente repetido pelo braço posteriormente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 pode ser observado um resumo das especificações técnicas do braço robótico, na qual podem ser consultados dados como suas características físicas, suas limitações e a descrição geral dos demais elementos responsáveis pelo seu funcionamento.

Tabela 2 – Especificações do protótipo do braço robótico desenvolvido.

Configuração	Articulado
Quantidade de eixos	4 eixos mais um acionador
Amplitude dos movimentos	
Rotação da Base	90°
Rotação do Ombro	90°
Rotação do Cotovelo	180°
Rotação do Punho	90°
Atuadores	Servomotores
Carga máxima	0,63kg (incluindo o aerógrafo)
Formas de controle pelo operador	1. Aplicativo de <i>Smartphone</i> 2. Miniatura do braço robótico potenciômetros
Tipo de alimentação	Fonte chaveada de 60W e 5V

Fonte: Autoria própria.

5.1 Fabricação e construção

Os componentes mecânicos do braço robótico foram fabricados utilizando uma impressora 3D modelo *Creality Ender 3*. Como matéria prima, foram utilizados filamentos do material plástico acrilonitrila butadieno estireno, conhecido também como ABS. Após fabricadas, as peças são montadas junto com os servomotores obtidos de forma como mostrado anteriormente na modelagem exposta na Figura 14. Na Figura 22 são mostrados os componentes fabricados do braço após a sua fabricação e montagem.

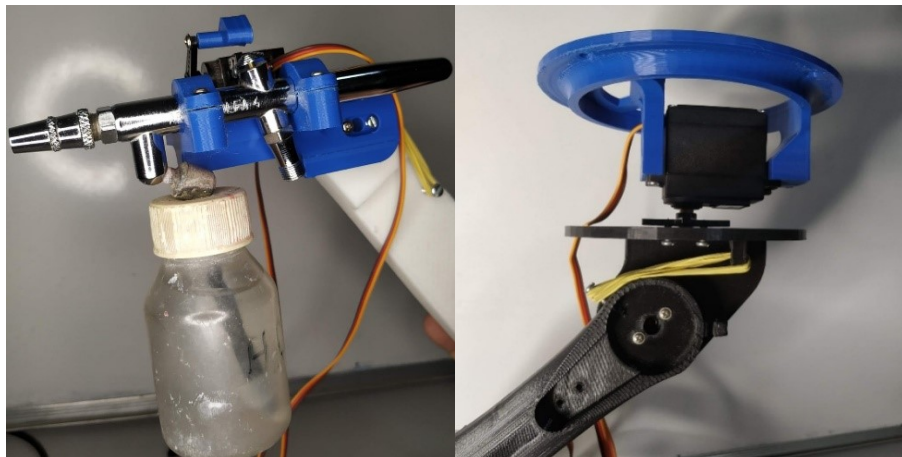
Figura 22 – Braço mecânico fabricado até o momento.



Fonte: Autoria própria.

Durante a montagem do mecanismo, foram adicionados elásticos nas juntas Ombro e Punho materiais elásticos de borracha para diminuir a carga sobre as referidas juntas causadas pelo peso das peças que suportam, com o objetivo de trazer mais estabilidade para o conjunto mecânico e economizar energia. Na Figura 23 pode se ver os elásticos adicionados ao mecanismo do braço.

Figura 23 – Elásticos acoplados ao mecanismo do braço.



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 24.

Figura 24 – Fonte de alimentação.



Fonte: Autoria própria.

5.2 Código de programação

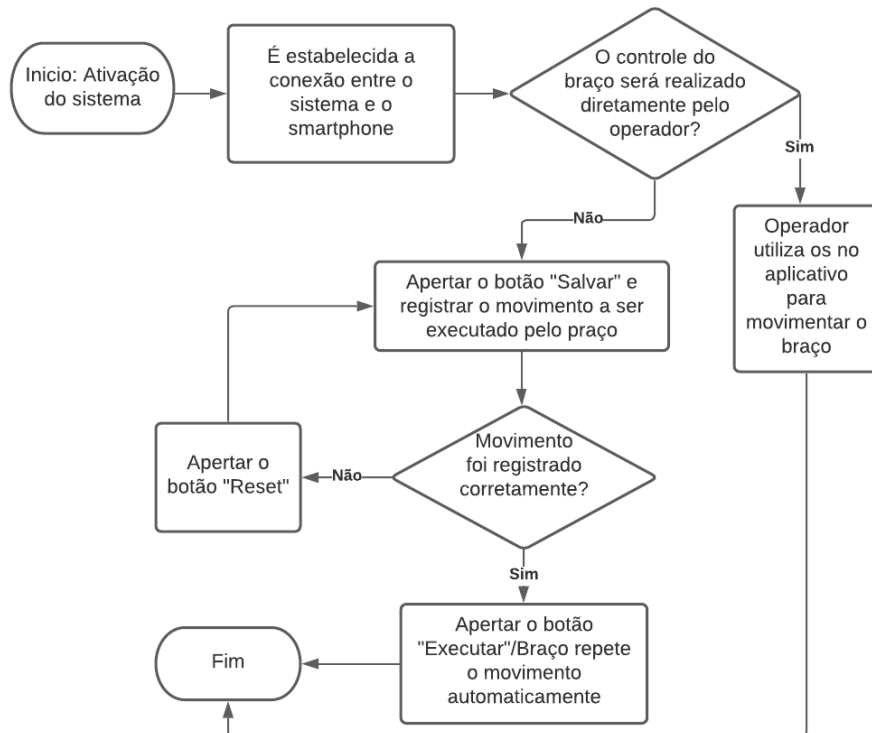
Foram desenvolvidos dois códigos de programação, na linguagem C, compatível com a IDE do Arduino. Cada um coordena os procedimentos para um dos tipos de controle desenvolvidos para o presente projeto.

5.2.1 Controle por aplicativo

Esse código engloba todo o procedimento de conexão do sistema com o *smartphone*, o processo de controle do braço mecânico, que pode ser feito diretamente pelo operador ou por meio de um movimento pré-programado anteriormente, e a ativação do aerógrafo para o processo de spray-pirólise. O código completo pode ser observado no APÊNDICE I. O fluxograma mostrado na Figura 25 descreve o procedimento a ser executado pelo referido código. Nele, inicialmente é estabelecida a conexão entre o *smartphone* e o módulo *bluetooth* acoplado ao braço. Se a conexão for bem-sucedida, o passo seguinte é usar os botões deslizantes no aplicativo para controlar os movimentos do braço sem registrá-los, ou apertar o botão “Salvar” e em seguida usar os botões deslizantes para registrar os movimentos a serem executados pelo mecanismo. Se o registro for bem-sucedido, aperta-se o botão “Executar” para que os movimentos sejam executados repetidamente por tempo

indeterminado até que se aperte o mesmo botão novamente. Se o registro não ocorrer como desejado, aperta-se o botão “Reset” tenta-se realizar o registro novamente.

Figura 25 – Fluxograma do procedimento a ser executado pelo código.



Fonte: Autoria própria.

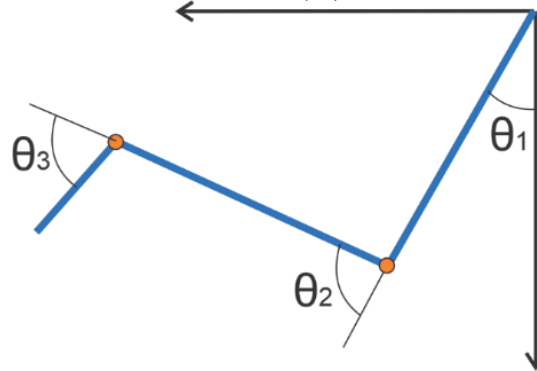
5.2.2 Controle por potenciômetros

Neste código, que é mostrado no APÊNDICE II, o procedimento é definido de forma que a partir de quando o sistema é alimentado por energia, os motores que compõem o mecanismo do braço irão se posicionar de forma semelhante à dos potenciômetros que compõem o controlador, até o momento em que o sistema é desligado.

5.3 Movimentos do mecanismo do Braço

Uma vez que o sistema foi montado e a etapa de programação concluída, foi verificada capacidade do mecanismo do protótipo fabricado de receber os comandos do operador e executá-los. Verificam-se os movimentos das juntas Ombro, Cotovelo e Punho, totalizando três graus de liberdade, como ilustrado na Figura 26. θ_1 , θ_2 and θ_3 representam os graus de liberdade.

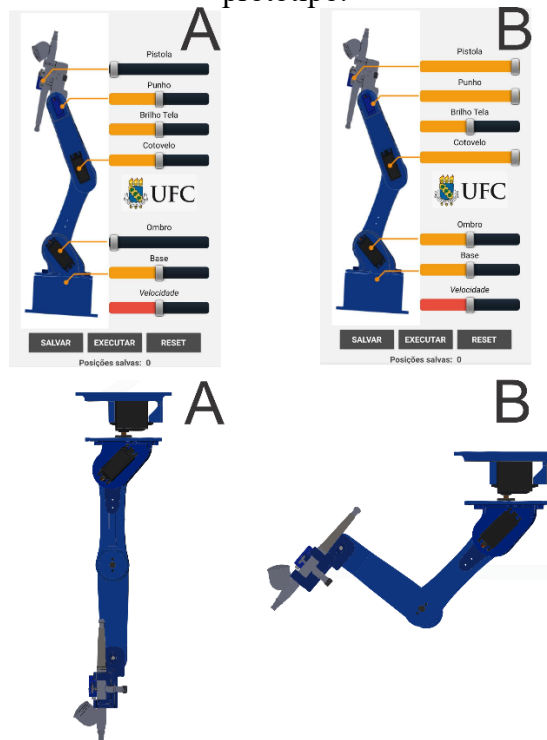
Figura 26 – Ângulos de posição das juntas do braço robótico. Ombro (θ_1), Cotovelo (θ_2) e Punho (θ_3).



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 27 são mostradas duas posições do braço robótico, uma ele estando em repouso (Posição A) e a outra estando pronto para execução trabalhos a comando do operador. Observa-se também as configurações dos botões deslizantes referentes a essas posições.

Figura 27 – Posições A e B representadas no aplicativo e no modelo tridimensional do protótipo.



Fonte: Autoria própria

A Tabela 3 mostra os valores obtidos para as duas posições mostradas. As posições dos botões deslizantes variam de 0% sendo sua posição que representa seu valor

mínimo e 100% seu valor máximo. As posições simuladas representam os valores que θ_1 , θ_2 e θ_3 deveriam teoricamente assumir após o braço receber os comandos do operador por meio dos botões deslizantes no aplicativo. As posições medidas são aquelas que o braço efetivamente assumiu após receber os comandos do aplicativo, medidas por meio de um transferidor. Observa-se que, inicialmente, quando o controle deslizante está em uma posição nula, tanto a saída simulada quanto a saída real estão na posição nula. Quando o botão da junta ombro é movido da posição 0% para 50%, o valor simulado de θ_1 se torna 45° enquanto o valor medido se torna 41° . Nota-se também que, quando o botão referente à junta Cotovelo é deslocado de 50% para 100%, o valor simulado de θ_2 é 90° enquanto o valor medido se torna 89° . Já no Punho, quando o seu respectivo botão é movido da posição 50% para 100%, θ_3 assume um valor simulado de 45° e medido de 40° .

Para verificar sua repetibilidade, o braço foi ordenado a ir para a mesma posição pelo menos cinco vezes, enquanto verificava-se quaisquer variações. Para obter melhores resultados, o experimento foi repetido para três locais diferentes.

Tabela 3 – Comparação de posições simuladas e reais obtidas do robô projetado

	Posições dos botões deslizantes			Posições simuladas			Posições medidas		
	Ombro	Cotovelo	Punho	θ_1	θ_2	θ_3	θ_1	θ_2	θ_3
A	0%	50%	50%	0°	0°	0°	0°	0°	0°
B	50%	100%	100%	45°	90°	45°	41°	89°	40°

Fonte: Autoria própria.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou a modelagem e fabricação de um braço robótico a ser utilizado na fabricação de placas fotovoltaicas de filmes finos. Um modelo tridimensional do braço foi desenvolvido e suas peças foram fabricadas por impressão 3D.

O sistema de controle eletrônico foi desenvolvido com o microcontrolador Arduino Uno, para o qual foi criado um código de programação de fonte aberta descrevendo todos os comandos a serem realizados pelo braço robótico. O operador pode controlar os movimentos do braço diretamente por um controlador desenvolvido com uma geometria que simule aquela do próprio braço, ou por meio de um aplicativo que permite registrar movimentos para que o braço os execute posteriormente, quantas vezes o operador julgar necessário.

A plataforma de controle é amigável ao operador e todo o projeto pode ser facilmente replicado e aprimorado em próximas etapas para a implementação na fabricação de placas fotovoltaicas de filme fino.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O próximo desafio proposto para trabalhos futuros é o de instalar o braço robótico na câmara de aquecimento utilizada como referência para o presente trabalho com o intuito de fabricar placas fotovoltaicas de filme fino. Sugere-se também a aplicação dos códigos desenvolvidos em placas de outras plataformas como os da linha ESP e o *Raspberry Pi*. Existe a possibilidade também de uma interface gráfica para os sistemas operacionais Windows e MAC para dar mais opções de interações do operador com o sistema.

Ademais, os códigos desenvolvidos devem ser continuamente aperfeiçoados para que falhas ainda não encontradas, mas que venham a surgir em aplicações futuras sejam solucionadas, além da implementação de novas funcionalidades como um contador de tempo de acionamento do aerógrafo para estimar a espessura da camada depositada de solução no substrato. Outros desafios são os da instalação de sensores que captem dados úteis para o operador, como a temperatura da câmara de aquecimento e a distância entre o aerógrafo e o substrato.

REFERÊNCIAS

- ABUBAKAR, A. N. et al. **Automated liquid filling system with a robotic arm conveyor for small scale industries**. *Materials Today: Proceedings*, v. 49, p. 3270–3273, 2022.
- ALHAMA BLANCO, P.; ABU-DAKKA, F.; ABDERRAHIM, M. **Practical Use of Robot Manipulators as Intelligent Manufacturing Systems**. *Sensors*, v. 18, n. 9, p. 2877, 31 ago. 2018. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/18/9/2877>>. Acesso em: 19 maio 2023.
- BANERJEE, A. et al. **Renewable, ethical? Assessing the energy justice potential of renewable electricity**. *AIMS Energy*, v. 5, n. 5, p. 768–797, 2017.
- CALCUTT, D.; COWAN, F.; PARCHIZADEH, H. **Introduction to Microcontrollers**. 8051 Microcontrollers. [S.l.]: Elsevier, 2004. p. 1–27.
- CARLISLE, J. E. et al. **Support for solar energy: Examining sense of place and utility-scale development in California**. *Energy Research and Social Science*, v. 3, n. C, p. 124–130, 2014.
- CHANG, R. D. et al. **Evolving theories of sustainability and firms: History, future directions and implications for renewable energy research**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 72, n. January, p. 48–56, 2017.
- CORTELETTI, D. **Introdução à programação de microcontroladores Microchip PIC**. Disponível em: <<http://sbrt.ibict.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NTE>>. Acesso em: 27 maio 2023.
- CRAVO, E. **O que é um Servo Motor, como funciona e quais as vantagens?** Disponível em: <<https://blog.kalatec.com.br/o-que-e-servo-motor/>>. Acesso em: 27 maio 2023.
- CULOT, G. et al. **Addressing Industry 4.0 Cybersecurity Challenges**. *IEEE Engineering Management Review*, v. 47, n. 3, p. 79–86, 1 jul. 2019. Acesso em: 19 dez. 2021.
- DRISCOLL, L. C. **The US Industrial Robot Market**. *Industrial Robot: An International Journal*, v. 1, n. 5, p. 222–224, maio 1974. Acesso em: 19 dez. 2021.
- EPE. **Relatório Síntese Balanço Energético Nacional Relatório Síntese**. 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>>. Acesso em: 01 dez. 2021

- FERREIRA, A. et al. **Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in brazil.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, n. June 2017, p. 181–191, 2018.
- FOUMANI, M.; SMITH-MILES, K.; GUNAWAN, I. **Scheduling of two-machine robotic rework cells:** In-process, post-process and in-line inspection scenarios. *Robotics and Autonomous Systems*, v. 91, p. 210–225, 1 maio 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921889016302573>>. Acesso em: 19 maio 2023.
- GARLET, T. B. et al. **Value chain in distributed generation of photovoltaic energy and factors for competitiveness:** A systematic review. *Solar Energy*, v. 211, n. September, p. 396–411, 2020.
- GROOVER, M. P. **Automação industrial e sistemas de manufatura.** 2011. Acesso em: 6 out. 2021.
- GÜNEY, T. **Solar energy, governance and CO2 emissions.** *Renewable Energy*, v. 184, p. 791–798, 1 jan. 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148121017195>>. Acesso em: 20 dez. 2021.
- GYAMFI, S. et al. **Renewable energy and sustainable development.** [S.l.]: Elsevier Inc., 2018.
- HEFFRON, R. et al. **Justice in solar energy development.** *Solar Energy*, v. 218, n. March, p. 68–75, 2021.
- HOFFMANN, W.; PELLKOFER, T. **Thin films in photovoltaics:** Technologies and perspectives. *Thin Solid Films*, v. 12, n. 520, p. 4094–4100, 2 abr. 2012. Disponível em: <<https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-0b0ace7d-8364-314e-9c95-13a6df2f3339>>. Acesso em: 21 dez. 2021.
- IBRAHIM, D.; IBRAHIM, D. **Chapter 1 – Microcomputer Systems.** [S.l: s.n.], 2008. Disponível em: <<http://mv.ezproxy.com.ez11.periodicos.capes.gov.br/book/9780750686112/advanced-pic-microcontroller-projects-in-c>>. Acesso em: 21 maio 2023.

- IRENA. GLOBAL RENEWABLES OUTLOOK. **Energy transformation 2050**.
/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020. [S.l: s.n.], 2020. Disponível em:
</publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>. Acesso em: 20 dez. 2021.
- ISHENGOMA, F. R.; MTAHO, A. B. **3D Printing: Developing Countries Perspectives**.
International Journal of Computer Applications, v. 104, n. 11, p. 30–34, 18 out. 2014.
- KATE, J. T.; SMIT, G.; BREEDVELD, P. 3D-printed upper limb prostheses: a review.
Disability and Rehabilitation: Assistive Technology, v. 12, n. 3, p. 300–314, 3 abr. 2017.
- KISHAN KONDAVEETI, H. et al. **A systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations**. Computer Science Review, v. 40, p. 100364, 2021. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/cosrev>. Acesso em: 25 maio 2023.
- LINO, E. **Desenvolvimento De Um Braço Robótico Controlado Por Arduino**. n. **Engenharia III**, p. 191–197, 2016.
- LO PIANO, S.; MAYUMI, K. **Toward an integrated assessment of the performance of photovoltaic power stations for electricity generation**. Applied Energy, v. 186, p. 167–174, 2017.
- LU, Y.; XU, X.; WANG, L. **Smart manufacturing process and system automation – A critical review of the standards and envisioned scenarios**. Journal of Manufacturing Systems, v. 56, p. 312–325, 1 jul. 2020.
- MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L. **Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project**. Solar Energy, v. 81, n. 4, p. 517–528, 2007.
- MATTEDE, H. **O que é Servo motor e como funciona? - Mundo da Elétrica**. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-servo-motor-e-como-funciona/>. Acesso em: 21 maio 2023.
- MAYRINCK, C. ; et al. **Célula Solar de Grätzel: Uma Proposta de Experimentação Interdisciplinar** The Grätzel Solar Cell: A Proposal for Interdisciplinary Experimentation. v. 2017, n. 2, p. 717–728, [S.d.].
- MCROBERTS, M. **Arduino Básico - 2ª edição: Tudo sobre o popular microcontrolador Arduino**. [S.l: s.n.], 2015.

- MENDONÇA, B. J. **Produção e Caracterização de Filmes Finos de TiO₂**. . [S.l: s.n.]. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-03052018-111901/publico/Mendonca_B_J_Dissertacao_Versao_Final.pdf>. Acesso em: 27 out. 2021. , 2018
- MILLER, G. **Beyond 100 % renewable: Policy and practical pathways to 24/7 renewable energy procurement**. Electricity Journal, v. 33, n. 2, p. 106695, 2020.
- MONK, S. **Programming Arduino: Getting Started with Sketches**, Second Edition. 2016.
- MORETON, P. **Industrial brushless servomotors**. p. 186, 2000.
- NĂSTASE, G. et al. **Photovoltaic development in Romania**. Reviewing what has been done. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 94, n. April, p. 523–535, 2018.
- O'REGAN, B.; GRÄTZEL, M. **A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films**. Nature, v. 353, n. 6346, p. 737–740, 1991. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/353737a0>>.
- OZTEMEL, E.; GURSEV, S. **Literature review of Industry 4.0 and related technologies**. Journal of Intelligent Manufacturing, v. 31, n. 1, p. 127–182, 24 jan. 2020. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10845-018-1433-8>>. Acesso em: 19 maio 2023.
- PEREDNIS, D.; GAUCKLER, L. J. **Thin Film Deposition Using Spray Pyrolysis**. Journal of Electroceramics, v. 14, p. 103–111, 2005. Acesso em: 28 out. 2021.
- QAMRUZZAMAN, M.; JIANGUO, W. **The asymmetric relationship between financial development, trade openness, foreign capital flows, and renewable energy consumption: Fresh evidence from panel NARDL investigation**. Renewable Energy, v. 159, p. 827–842, 2020.
- QUEIROZ, W. R. DE O.; SOUSA, W. Q. DE. **A importância da plataforma arduino no meio acadêmico**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, p. 123–133, 29 ago. 2018.
- SHAH, A. et al. **Photovoltaic Technology: The Case for Thin-Film Solar Cells**. Science, v. 285, n. 5428, p. 692–698, 30 jul. 1999. Disponível em: <<https://science.sciencemag.org/content/285/5428/692>>. Acesso em: 12 jul. 2021.
- SHAH, R.; PANDEY, A. B. **Concept for Automated Sorting Robotic Arm**. Procedia Manufacturing, v. 20, p. 400–405, 2018.

SILVA, P. P. DA et al. **Photovoltaic distributed generation** – An international review on diffusion, support policies, and electricity sector regulatory adaptation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 103, n. April 2018, p. 30–39, 2019.

SMITH, D. L. **Thin-Film Deposition, Principles and Practice**. [S.l.]: McGrawHill, 1995.

SÜTTERLIN, B.; SIEGRIST, M. **Public acceptance of renewable energy technologies from an abstract versus concrete perspective and the positive imagery of solar power**. *Energy Policy*, v. 106, n. May 2016, p. 356–366, 2017.

TAHIR, M. B. et al. **Photocatalytic nanomaterials for degradation of organic pollutants and heavy metals**. *Nanotechnology and Photocatalysis for Environmental Applications*, p. 119–138, 1 jan. 2020. Acesso em: 28 out. 2021.

TATSCH, P. J. **Deposição de Filmes Finos**. [S.l: s.n.], 2000.

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. Acesso em: 19 dez. 2021.

TIWARI, V.; LEE, T.C. **Power Analysis of a 32-bit Embedded Microcontroller**. v. 7, n. 3, p. 225–242, 1998.

Trossen Robotics - **Robotic Arms, Crawlers Turrets and more!** Disponível em: <<https://www.trossenrobotics.com/>>. Acesso em: 24 maio 2023.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Paris Agreement - Status of Ratification. UNFCCC. 2018, [S.l: s.n.], 2018.

VAISI, B. **A review of optimization models and applications in robotic manufacturing systems: Industry 4.0 and beyond**. *Decision Analytics Journal*, v. 2, p. 100031, 1 mar. 2022. Acesso em: 19 maio 2023.

WANG, L.; SHIH, A. J. **Challenges in smart manufacturing**. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 40, p. 1, 1 jul. 2016.

YU, C. et al. **A fast robotic arm gravity compensation updating approach for industrial application using sparse selection and reconstruction**. *Robotics and Autonomous Systems*, v. 149, p. 103971, mar. 2022.

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. Disponível em: <<https://econjournals.com/index.php/ijee/article/view/10590>>. Acesso em: 20 dez. 2021.

APÊNDICE A - CÓDIGO COM APLICATIVO EM FORMATO C

Declaração das variáveis

```
#include <NeoSWSerial.h>

#include <Servo.h>

Servo servo01;

Servo servo02;

Servo servo03;

Servo servo04;

Servo servo05;

Servo servo06;

NeoSWSerialBluetooth( 3, 4);

int servo1Pos, servo2Pos, servo3Pos, servo4Pos, servo5Pos, servo6Pos; // current position

int servo1PPos, servo2PPos, servo3PPos, servo4PPos, servo5PPos, servo6PPos; // previous
position

int servo01SP[50], servo02SP[50], servo03SP[50], servo04SP[50], servo05SP[50],
servo06SP[50]; // for storing positions/steps

int speedDelay = 20;

int index = 0;

String dataIn = "";
```

Declarar as portas para cada servo

```
void setup() {

servo01.attach(5);

servo02.attach(6);

servo03.attach(7);

servo04.attach(8);

servo05.attach(9);

servo06.attach(10);
```

```
Bluetooth.begin(9600);
```

```
Serial.begin(9600);
```

```
Bluetooth.setTimeout(10);
```

```
delay(20);
```

Mover servos para suas posições iniciais

```
servo1PPos = 90;
```

```
servo01.write(servo1PPos);
```

```
servo2PPos = 150;
```

```
servo02.write(servo2PPos);
```

```
servo3PPos = 35;
```

```
servo03.write(servo3PPos);
```

```
servo4PPos = 140;
```

```
servo04.write(servo4PPos);
```

```
servo5PPos = 85;
```

```
servo05.write(servo5PPos);
```

```
servo6PPos = 80;
```

```
servo06.write(servo6PPos);
```

```
}
```

Verificar Conexão com o módulo bluetooth

```
void loop() {
```

```
// Check for incoming data
```

```
if (Bluetooth.available() > 0) {
```

```
dataIn = Bluetooth.readString();
```

```
Serial.println(dataIn);
```

Mover servo 1 (Cintura)

```
if (dataIn.startsWith("s1")) {
```

```
String dataInS = dataIn.substring(2, dataIn.length());
```

```

servo1Pos = dataInS.toInt
if (servo1PPos > servo1Pos) {
    for ( int j = servo1PPos; j >= servo1Pos; j--) { // Run servo down
servo01.write(j);
delay(20); // defines the speed at which the servo rotates
    }
    }
if (servo1PPos < servo1Pos) {
    for ( int j = servo1PPos; j <= servo1Pos; j++) { // Run servo up
servo01.write(j);
delay(20);
    }
    }
servo1PPos = servo1Pos;
}

```

Mover Servo 2

```

if (dataIn.startsWith("s2")) {
    String dataInS = dataIn.substring(2, dataIn.length());
servo2Pos = dataInS.toInt();
if (servo2PPos > servo2Pos) {
    for ( int j = servo2PPos; j >= servo2Pos; j--) {
servo02.write(j);
delay(50);
    }
    }
if (servo2PPos < servo2Pos) {

```

```

    for ( int j = servo2PPos; j <= servo2Pos; j++) {
        servo02.write(j);
    }
    delay(50);
}
servo2PPos = servo2Pos;
}

```

Mover Servo 3

```

if (dataIn.startsWith("s3")) {
    String dataInS = dataIn.substring(2, dataIn.length());
    servo3Pos = dataInS.toInt();
    if (servo3PPos > servo3Pos) {
        for ( int j = servo3PPos; j >= servo3Pos; j--) {
            servo03.write(j);
        }
        delay(30);
    }
    if (servo3PPos < servo3Pos) {
        for ( int j = servo3PPos; j <= servo3Pos; j++) {
            servo03.write(j);
        }
        delay(30);
    }
    servo3PPos = servo3Pos;
}

```

Mover servo 4

```

if (dataIn.startsWith("s4")) {

```

```

    String dataInS = dataIn.substring(2, dataIn.length());
servo4Pos = dataInS.toInt();
if (servo4PPos > servo4Pos) {
    for ( int j = servo4PPos; j >= servo4Pos; j--) {
        servo04.write(j);
    }
    delay(30);
}
if (servo4PPos < servo4Pos) {
    for ( int j = servo4PPos; j <= servo4Pos; j++) {
        servo04.write(j);
    }
    delay(30);
}
servo4PPos = servo4Pos;
}

```

Mover Servo 5

```

if (dataIn.startsWith("s5")) {
    String dataInS = dataIn.substring(2, dataIn.length());
servo5Pos = dataInS.toInt();
if (servo5PPos > servo5Pos) {
    for ( int j = servo5PPos; j >= servo5Pos; j--) {
        servo05.write(j);
    }
    delay(30);
}
}

```

```

if (servo5PPos < servo5Pos) {
    for ( int j = servo5PPos; j <= servo5Pos; j++) {
        servo05.write(j);
    }
    delay(30);
}
servo5PPos = servo5Pos;
}

```

Mover Servo 6

```

if (dataIn.startsWith("s6")) {
    String dataInS = dataIn.substring(2, dataIn.length());
    servo6Pos = dataInS.toInt();
    if (servo6PPos > servo6Pos) {
        for ( int j = servo6PPos; j >= servo6Pos; j--) {
            servo06.write(j);
        }
        delay(30);
    }
    if (servo6PPos < servo6Pos) {
        for ( int j = servo6PPos; j <= servo6Pos; j++) {
            servo06.write(j);
        }
        delay(30);
    }
    servo6PPos = servo6Pos;
}

```

Salvar movimento ao pressionar o botão “Salvar”

```

if (dataIn.startsWith("SAVE")) {
servo01SP[index] = servo1PPos;
servo02SP[index] = servo2PPos;
    servo03SP[index] = servo3PPos;
    servo04SP[index] = servo4PPos;
    servo05SP[index] = servo5PPos;
servo06SP[index] = servo6PPos;
index++;
}

```

Executar movimento

```

if (dataIn.startsWith("RUN")) {
runservo(); // Automatic mode - run the saved steps
}

```

Apagar movimento salvo (Botão “RESET”)

```

if ( dataIn == "RESET") {
memset(servo01SP, 0, sizeof(servo01SP));
memset(servo02SP, 0, sizeof(servo02SP));
memset(servo03SP, 0, sizeof(servo03SP));
memset(servo04SP, 0, sizeof(servo04SP));
memset(servo05SP, 0, sizeof(servo05SP));
memset(servo06SP, 0, sizeof(servo06SP));
    index = 0; // Index to 0
}
}
else {
Serial.println("no");

```

```
}

```

```
}

```

Iniciar modo automático / Executar passos salvos

```
void runservo() {

```

```
  while (dataIn != "RESET") {

```

```
    for (int i = 0; i<= index - 2; i++) {

```

```
      if (Bluetooth.available() > 0) {

```

```
dataIn = Bluetooth.readString();

```

```
      if ( dataIn == "PAUSE") {

```

```
        while (dataIn != "RUN") {

```

```
          if (Bluetooth.available() > 0) {

```

```
dataIn = Bluetooth.readString();

```

```
          if ( dataIn == "RESET") {

```

```
break;

```

```
        }

```

```
      }

```

```
    }

```

```
  }

```

```
  // If speed slider is changed

```

```
  if (dataIn.startsWith("ss")) {

```

```
    String dataInS = dataIn.substring(2, dataIn.length());

```

```
speedDelay = dataInS.toInt(); // Change servo speed (delay time)

```

```
  }

```

```
  }

```

```
  // Servo 1

```

```
if (servo01SP[i] == servo01SP[i + 1]) {  
    }  
if (servo01SP[i] > servo01SP[i + 1]) {  
    for ( int j = servo01SP[i]; j >= servo01SP[i + 1]; j-- ) {  
servo01.write(j);  
        delay(speedDelay);  
    }  
}  
if (servo01SP[i] < servo01SP[i + 1]) {  
    for ( int j = servo01SP[i]; j <= servo01SP[i + 1]; j++ ) {  
servo01.write(j);  
        delay(speedDelay);  
    }  
}  
  
    // Servo 2  
if (servo02SP[i] == servo02SP[i + 1]) {  
    }  
if (servo02SP[i] > servo02SP[i + 1]) {  
    for ( int j = servo02SP[i]; j >= servo02SP[i + 1]; j-- ) {  
servo02.write(j);  
        delay(speedDelay);  
    }  
}  
if (servo02SP[i] < servo02SP[i + 1]) {  
    for ( int j = servo02SP[i]; j <= servo02SP[i + 1]; j++ ) {
```

```
servo02.write(j);
    delay(speedDelay);
}
}

// Servo 3
if (servo03SP[i] == servo03SP[i + 1]) {
    }
if (servo03SP[i] > servo03SP[i + 1]) {
    for ( int j = servo03SP[i]; j >= servo03SP[i + 1]; j--) {
servo03.write(j);
        delay(speedDelay);
    }
    }
if (servo03SP[i] < servo03SP[i + 1]) {
    for ( int j = servo03SP[i]; j <= servo03SP[i + 1]; j++) {
servo03.write(j);
        delay(speedDelay);
    }
    }
// Servo 4
if (servo04SP[i] == servo04SP[i + 1]) {
    }
if (servo04SP[i] > servo04SP[i + 1]) {
    for ( int j = servo04SP[i]; j >= servo04SP[i + 1]; j--) {
servo04.write(j);
```

```
        delay(speedDelay);
    }
}

if (servo04SP[i] < servo04SP[i + 1]) {
    for ( int j = servo04SP[i]; j <= servo04SP[i + 1]; j++) {
servo04.write(j);
        delay(speedDelay);
    }
}

// Servo 5

if (servo05SP[i] == servo05SP[i + 1]) {
    }

if (servo05SP[i] > servo05SP[i + 1]) {
    for ( int j = servo05SP[i]; j >= servo05SP[i + 1]; j--) {
servo05.write(j);
        delay(speedDelay);
    }
}

if (servo05SP[i] < servo05SP[i + 1]) {
    for ( int j = servo05SP[i]; j <= servo05SP[i + 1]; j++) {
servo05.write(j);
        delay(speedDelay);
    }
}

// Servo 6
```

```
if (servo06SP[i] == servo06SP[i + 1]) {  
    }  
if (servo06SP[i] > servo06SP[i + 1]) {  
    for ( int j = servo06SP[i]; j >= servo06SP[i + 1]; j-- ) {  
servo06.write(j);  
        delay(speedDelay);  
    }  
    }  
if (servo06SP[i] < servo06SP[i + 1]) {  
    for ( int j = servo06SP[i]; j <= servo06SP[i + 1]; j++ ) {  
servo06.write(j);  
        delay(speedDelay);  
    }  
    }  
    }  
    }  
    }
```

APÊNDICE B - CÓDIGO SEM APLICATIVO EM FORMATO C

Declaração das variáveis

```
#include <Servo.h>

Servo base;

Servo ombro1;

Servo ombro2;

Servo cotovelo;

Servo punho;

Servo pistola;

intbotao_acionador = 4;

int pino_leitor_0 = 0; // analog pin usedtoconnectthepotentiometer
int val_0; // variabletoreadthevaluefromtheanalog pin

int pino_leitor_1_2 = 1; // analog pin usedtoconnectthepotentiometer
int val_1_2; // variabletoreadthevaluefromtheanalog pin

int pino_leitor_3 = 2; // analog pin usedtoconnectthepotentiometer
int val_3; // variabletoreadthevaluefromtheanalog pin

int pino_leitor_4 = 3; // analog pin usedtoconnectthepotentiometer
int val_4; // variabletoreadthevaluefromtheanalog pin
```

Declarar as portas para cada servo

```
voidsetup() {

Serial.begin(9600);

base.attach(10);

ombro1.attach(9);

ombro2.attach(8);

cotovelo.attach(7);

punho.attach(6);

pistola.attach(5);
```

```
}
```

Movimento dos motores

```
voidloop() {  
  
  val_0 = analogRead(pino_leitor_0);  
  val_0 = map(val_0, 525, 750, 45, 135);  
  val_0 = constrain(val_0, 45, 135);  
  base.write(val_0);  
  
  val_1_2 = analogRead(pino_leitor_1_2);  
  val_1_2 = map(val_1_2, 900, 600, 60, 150);  
  val_1_2 = constrain(val_1_2, 60, 150);  
  ombro1.write(val_1_2);  
  ombro2.write(180-val_1_2);  
  
  val_3 = analogRead(pino_leitor_3);  
  val_3 = map(val_3, 130, 450, 45, 135);  
  val_3 = constrain(val_3, 45, 135);  
  cotovelo.write(val_3);  
  
  val_4 = analogRead(pino_leitor_4);  
  val_4 = map(val_4, 450, 850, 45, 135);  
  val_4 = constrain(val_4, 45, 120);  
  punho.write(val_4);  
  
  if (digitalRead(botao_acionador) == HIGH) {  
  pistola.write(45);
```

```
    }  
    else {  
        pistola.write(90);  
    }
```

Exibe valores na tela serial

```
    Serial.print(val_0);  
    Serial.print(" ");  
    Serial.print(val_1_2);  
    Serial.print(" ");  
    Serial.print(val_3);  
    Serial.print(" ");  
    Serial.println(val_4);  
  
    delay(15);  
}
```