



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
TECNOLOGIA EM ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS

LUCA KUROTAKI

SISTEMA DE CONTROLE E MONITORAMENTO PARA MÁQUINA EXTRUSORA

TERESINA

2024

LUCA KUROTAKI

SISTEMA DE CONTROLE E MONITORAMENTO PARA MÁQUINA EXTRUSORA

Projeto apresentado à Banca Examinadora como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do Curso Superior de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí.

Orientador: Prof. M^º. Fernando Castelo Branco Gonçalves Santana

Coorientador: Prof. Dr. Thiago Alves Elias da Silva

TERESINA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Kurotaki, Luca
K96s Sistema de controle e monitoramento para máquina extrusora / Luca
Kurotaki. - 2024.
44 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Análise e
Desenvolvimento de Sistemas) - Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, 2024.
Orientador : Prof Me. Fernando Castelo Branco Gonçalves Santana.
1. Plástico. 2. Reciclagem. 3. Extrusora. 4. Automação. I. Título.

CDD - 004.21

Elaborado por Maria Rosismar Farias CRB 3/631

LUCA KUROTAKE

SISTEMA DE CONTROLE E MONITORAMENTO PARA MÁQUINA EXTRUSORA

Projeto apresentado à Banca Examinadora como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do Curso Superior de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí.

Aprovado pela banca examinadora em _____.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. M^º. Fernando Castelo Branco Gonçalves Santana
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI

Prof. Dr. Thiago Alves Elias da Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI

Prof. Dr. Ricardo Martins Ramos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI

Prof. Me. Jorge Henrique e Silva Junior
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI

TERESINA

2024

Dedico este trabalho a Deus, à minha família e a todos que me ajudaram de alguma maneira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por estar presente em todos os momentos da minha vida.

Agradeço à minha família, pelo apoio, pelo carinho e pela atenção.

Agradeço ao professor Fernando Santana, por ter apoiado a minha decisão de fazer a pesquisa, por ter colocado à minha disposição os projetos do LIMS, e por todo o acompanhamento nesse período.

Agradeço ao Luiz Júnior, por me apresentar os projetos do LIMS e me ajudar na escolha do tema.

Agradeço ao Abraão e André, pelas ajudas atenciosas e fundamentais para a realização do trabalho.

Agradeço a todos os professores do curso, que me capacitaram ao longo desses anos.

E, por fim, agradeço especialmente ao meu irmão Giovanni, pela atenção e disponibilidade, mas, sobretudo, pelos conselhos e providências imprescindíveis e decisivos para o desenvolvimento e a conclusão do presente trabalho.

*“Se a meta principal de um capitão fosse preservar seu barco,
ele o conservaria no porto para sempre.”
(Santo Tomás de Aquino)*

RESUMO

Os problemas ambientais relacionados ao plástico passaram a ser motivo de preocupação para a sociedade há algumas décadas. Seja pelo modo de produção, cuja matéria prima é o petróleo - que, por si só, é causa de diversos impactos ambientais -, seja pelo processo de descarte, em que o cerne do problema reside no tempo de decomposição do material, o uso massivo de plástico acarreta em fortes danos ao meio ambiente. Diante do exposto, uma das soluções viáveis encontradas foi a reciclagem do material, uma vez que ameniza o problema tanto da produção quanto do descarte. E, dentre os meios de reciclagem, está o processo de extrusão, que consiste na fabricação de peças por meio do material aquecido, passado por um molde. O Projeto Lavoisier, uma iniciativa do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI), trabalha, entre outras coisas, com a extrusão de plástico para reciclagem. Nesse cenário, o presente trabalho dispõe um meio de impulsionar o processo de extrusão do projeto supracitado, ao desenvolver um sistema de controle e monitoramento remoto, a fim de facilitar e agilizar a atividade em questão.

Palavras-chaves: plástico; reciclagem; extrusora; automação.

ABSTRACT

The environmental problems related to plastic have become a matter of concern for society for a few decades. Whether it's the production process, which relies on petroleum as its raw material - which in itself causes various environmental impacts - or the disposal process, where the core issue lies in the material's decomposition time, the massive use of plastic results in significant damage to the environment. In light of this, one of the viable solutions found was the recycling of the material, as it alleviates the problem of both production and disposal. Among the recycling methods is the extrusion process, which involves the manufacturing of parts through heated material passed through a mold. The Lavoisier Project, an initiative of the Federal Institute of Education, Science, and Technology of Piauí (IFPI), works, among other things, with plastic extrusion for recycling. In this context, the present work provides a way to boost the extrusion process of the aforementioned project by developing a remote control and monitoring system, aiming to simplify and expedite the task at hand.

Key-words: plastic; recycling; extruder; automation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de um processo de extrusão	16
Figura 2 – Diagrama de uma extrusora de acordo com Giles, Mount e Wagner	17
Figura 3 – ESP32-C3 RISC-V NodeMCU	19
Figura 4 – Visão geral da configuração	22
Figura 5 – Extrusora adquirida pelo Projeto Lavoisier	25
Figura 6 – Extrusora do LIMS	26
Figura 7 – Termostato W1902	26
Figura 8 – Estrutura geral do Sistema de Controle e Monitoramento	27
Figura 9 – Representação esquemática das conexões ESP32 com dispositivos periféricos	29
Figura 10 – Diagrama de dados armazenados no Realtime Database	30
Figura 11 – Diagrama de pré-configurações salvas no Realtime Database	30
Figura 12 – Página principal do aplicativo Extruder App com os interruptores desligados	31
Figura 13 – Página principal do aplicativo Extruder App com o interruptor dos aquecedores ligado	32
Figura 14 – Página principal do aplicativo Extruder App com os interruptores ligados	33
Figura 15 – Definição do valor da temperatura através da digitação	33
Figura 16 – Janela de confirmação para salvar a pré-configuração	34
Figura 17 – Pré-configurações listadas no drawer	34
Figura 18 – Confirmação da exclusão da pré-configuração	35
Figura 19 – Estrutura reduzida de dispositivos eletrônicos	36
Figura 20 – Diagrama esquemático do ESP32 e os dispositivos periféricos	37
Figura 21 – Sensores de temperatura	38
Figura 22 – LEDs conectados ao ESP32 para indicar os estados dos aquecedores	39
Figura 23 – Os dispositivos para controle e monitoramento do motor elétrico	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	Application Programming Interface
CPS	Cyber-Physical System
CPU	Central Processing Unit
GND	Ground
GPIO	General Purpose Input/Output
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IDE	Integrated Development Environment
IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
IoT	Internet of Things
JSON	JavaScript Object Notation
LIMS	Laboratorio de Inovações em Sistemas Multimídias
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NoSQL	Not only Structured Query Language
PSS	Product-Service System
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Access Memory
ROM	Read-Only Memory
Wi-Fi	Wireless Fidelity

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	Justificativa	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Automação Industrial	15
2.2	Máquina Extrusora	15
2.2.1	Polímeros recicláveis pelo processo de extrusão	17
2.3	Microcontrolador	18
2.3.1	Microcontrolador ESP32	18
3	TRABALHOS RELACIONADOS	20
3.1	Do projeto PSS ao CPS: um caso de uso industrial real direcionado à Indústria 4.0	20
3.2	Arquitetura de Nuvem para a Internet das Coisas, voltada para Monitoramento e Controle Remoto de Dispositivos Industriais	21
4	SISTEMA DE CONTROLE E MONITORAMENTO PARA MÁQUINA EXTRUSORA	23
4.1	Dispositivos utilizados no sistema de controle e monitoramento	23
4.2	Esquematização da estrutura geral do Sistema de Controle e Monitoramento	27
4.2.1	Comunicação entre a extrusora e o microcontrolador	28
4.2.2	Firebase Realtime Database	29
4.3	Extruder App	31
5	RESULTADOS	36
6	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS	42
	ANEXO A – CÓDIGOS DAS APLICAÇÕES	44

1 INTRODUÇÃO

Embora as primeiras evidências históricas sobre o uso humano de materiais poliméricos sejam de aproximadamente 1600 a.C., encontradas na região de Mesoamérica, cujos habitantes produziam estatuetas, bolas e bandas a partir de borrachas naturais (Hosler, Buckett e Tarkanian[1], 1999), o primeiro polímero sintético foi criado somente em 1907, a baquelite, considerada como o primeiro plástico moderno. Desde então, foram aprimorados diversos meios de fabricação de plásticos (Cole et al.[2], 2011).

Aproximadamente quarenta anos após a invenção da baquelite, começa a produção em massa de plásticos, entre os anos 1940 e 1950. (Cole et al.[2], 2011). Por um lado, os polímeros sintéticos são fundamentais para a fabricação de produtos e equipamentos de todos os setores econômicos, desde embalagens dos produtos agrícolas, roupas, peças de automóveis até ferramentas laboratoriais mais sofisticadas, devido ao custo relativamente baixo e, sobretudo, pelo fato de atender a mais variadas exigências quanto à característica do material: tamanho, espessura, flexibilidade, resistência térmica, maleabilidade, etc. (Geyer, Jambeck e Law[3], 2017).

Por outro lado, o uso massivo de plásticos impacta acentuadamente nos problemas ambientais. Devido à decomposição demorada, os resíduos descartados nos aterros, rios e oceanos prejudicam a saúde humana e a segurança alimentar, bem como a saúde dos animais e até mesmo o equilíbrio dos ecossistemas. Ainda, o tratamento desses resíduos geram gastos financeiros e necessidade contínua de ampliação dos aterros, fato este que é desafio maior para regiões urbanas e países com alta densidade demográfica.

Outro problema importante da produção de plásticos e de demais polímeros derivados de petróleo é a incerteza quanto à capacidade real das reservas petrolíferas. Em 2018, estimava-se que ainda havia reserva pelos próximos 54 anos (Muggeridge et al.[4], 2014) e, embora essa estimativa tenha sido renovada pelo prazo semelhante ao longo dos anos, é sempre acompanhada pela possibilidade de não encontrar mais reservas nos anos posteriores. E um eventual fim do petróleo acarretará em consequências desastrosas para toda a estrutura econômica global, caso não haja alternativas a esse recurso natural.

Nesse cenário, a reciclagem é uma solução mais apropriada, uma vez que reduz tanto a necessidade de fabricação de novos plásticos quanto a quantidade de resíduos. Em que pese o baixo percentual de polímeros reciclados desde que o material passou a ser produzido em larga escala, pois, das 8300 toneladas de plástico produzido entre 1950 e 2015, somente 600 toneladas foram reaproveitadas (Geyer, Jambeck e Law[3], 2017); ainda assim, é o meio mais viável e eficaz para a diminuição dos problemas ambientais.

Entre os meios de reciclagem, está a extrusão, que consiste no processo de derretimento

de um dado material e sua passagem por uma matriz, a fim de obter produtos contínuos com formas predeterminadas. Este processo não é voltado exclusivamente para reciclagem ou plásticos, pelo contrário, foi inventado inicialmente para produtos novos e de demais elementos como metais, e é amplamente utilizado até hoje (Rauwendaal[5], 2013).

É necessário frisar, no entanto, que a extrusão e demais processos de reciclagem já existentes não são capazes de lidar com a vasta quantidade e variedade de resíduos poliméricos produzidos incessantemente (Cole et al.[2], 2011). É indispensável descobrir e implementar outras alternativas, sobretudo as matérias primas que sejam menos prejudiciais no procedimento de extração, processamento e/ou descarte, capazes de substituir os produtos derivados do petróleo. Não obstante, os meios já existentes não devem ser desconsiderados, antes, ampliados e aprimorados.

Diante do exposto, uma das possibilidades de otimização desses meios pode ser encontrada nas inovações tecnológicas. Os avanços da automação industrial, por exemplo, podem ser empregados na melhoria dos processos de reciclagem, como o aumento de desempenho e do nível de precisão no monitoramento de setores, máquinas e ferramentas de uma instalação. Os recursos tecnológicos, hoje, permitem a emissão, recepção, processamento e armazenamento de informações em velocidade e quantidade descomunal, de sorte que sua integração no processo de reciclagem já existentes podem amplificar consideravelmente o efeito sobre os problemas confrontados (Groover[6], 2007).

Em vista disso, a fim de analisar a dinâmica de implementação dos recursos tecnológicos aos processos de reciclagem, o presente trabalho visa à criação de um sistema de controle e monitoramento remoto da máquina extrusora que pertence ao Projeto Lavoisier, uma iniciativa do IFPI¹, cuja finalidade é pesquisar sobre o reaproveitamento de materiais recicláveis.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema, baseado em aplicação mobile, de controle e monitoramento de uma máquina extrusora.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar o funcionamento de uma extrusora, com foco em características eletrônicas de seus controladores, a fim de estabelecer os meios de comunicação com o Sistema de Controle e Monitoramento;
- Analisar o microcontrolador, suas possibilidades de conexão e tratamento de dados, a fim de definir o modo de comunicação do microcontrolador com a máquina extru-

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí

sora e banco de dados, assim como os procedimentos necessários para a recepção, transformação e emissão de dados;

- Estruturar o sistema, interligando o controlador com a extrusora, microcontrolador, banco de dados e aplicativo móvel, de maneira que a comunicação entre todas as partes conectadas se dê de forma concisa.

1.2 JUSTIFICATIVA

Considerando a quantidade massiva de resíduos plásticos existentes e produzidos diariamente em todo o mundo, é inegável a necessidade de ampliação e otimização dos meios de reciclagem já existentes. Com efeito, mesmo que sejam descobertas alternativas aos polímeros sintéticos derivados do petróleo, os resíduos já dispersos no meio ambiente persistirão com seus efeitos prejudiciais, uma vez que o tempo de decomposição desses compostos é relativamente longo, na casa das centenas de anos (Geyer, Jambeck e Law[3], 2017). Portanto, a redução ou até mesmo a interrupção da produção de plásticos não basta para impedir os impactos ambientais, e os meios de reaproveitamento desse material devem ser continuados e aprimorados, até que os efeitos adversos sejam reduzidos.

Nesse cenário, para obter resultados esperados, a nível global, no combate à poluição oriunda dos polímeros sintéticos, são necessários grandes projetos e instalações de reciclagem, e, em última análise, uma drástica transformação em todos os setores econômicos, políticos e sociais, inviável a curto ou médio prazo (Cole et al.[2], 2011). À vista disso, a simples adaptação tecnológica dos pequenos equipamentos e processos de reciclagem não indica grande avanço na solução da problemática em questão. Ainda assim, não devem ser desprezados os efeitos positivos que essa otimização pode proporcionar em realidades menores (Groover[6], 2007).

Por exemplo, uma iniciativa de reciclagem em um bairro ou uma cidade pequena pode solucionar problemas concretas que estão a seu alcance, como os riscos de inundação, ocasionadas pelos bueiros obstruídos com plásticos, e a emissão de microplásticos no ar e água, partículas estas que são potenciais causas de doenças pulmonares (Dong et al.[7], 2020) e de infertilidade masculina (D'Angelo e Meccariello[8], 2020). Nesse caso, o aumento de desempenho das máquinas ou do processo em si propicia resultados mais expressivos para a realidade à qual a iniciativa atende.

Portanto, o presente trabalho pode contribuir com o bem-estar da população e com a preservação dos ecossistemas, à medida que os resultados do estudo podem ser aplicados em ambientes mais simples, pois tanto a extrusora quanto o aplicativo móvel são de uso acessível, e também de baixo custo e de aquisição fácil, se comparados com alternativas de reciclagem mais complexas e sofisticadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

Automação é um dos principais, senão o principal avanço tecnológico dentre os iniciados a partir da Revolução Industrial, no século XVIII. Da primeira fase, marcada pelo uso do carvão mineral e da máquina a vapor, seguida de segunda fase, cujo petróleo e energia elétrica são recursos fundamentais, até atingir a terceira e a quarta fase, possibilitadas pela evolução da eletrônica e da computação, foram concebidos e aprimorados diversos processos de automação, que Gupta e Arora[9] (2007, p.1, tradução minha) definem como:

[...] processo que segue uma sequência de operações predeterminadas com pouco ou nenhum trabalho humano, utilizando equipamentos especializados e dispositivos que executam e controlam processos de fabricação. [...] Ou, automação é o processo industrial em que diversas operações de produção são convertidas de um processo manual para processo automatizado ou mecanizado.¹

Groover[6] lista os benefícios da automação, como: aumento da produtividade de trabalho; redução do custo de trabalho; abrandamento da falta de mão de obra; redução ou eliminação das tarefas manuais e de escritório; aumento de segurança dos funcionários; melhora na qualidade de produtos; redução do tempo de espera de fabricação; e realização de processos que não podem ser executados manualmente (Groover[6], 2007).

Para Roggia e Cardozo[10] (2016), a automação pode ser classificada em três tipos: rígida, programável e flexível. A primeira é voltada para produção de um item específico em grande quantidade, cujo equipamento utilizado não acomoda variedade de produção. A automação programável, por sua vez, é direcionada para produção adaptável, em que o aparelho de fabricação pode ter sua sequência de operações modificada em função da alteração de programas. No entanto, não é apropriada para produção em grande volume. Por fim, a automação flexível possui características dos dois tipos anteriores, porém a produção é menos adaptável do que na automação programada.

2.2 MÁQUINA EXTRUSORA

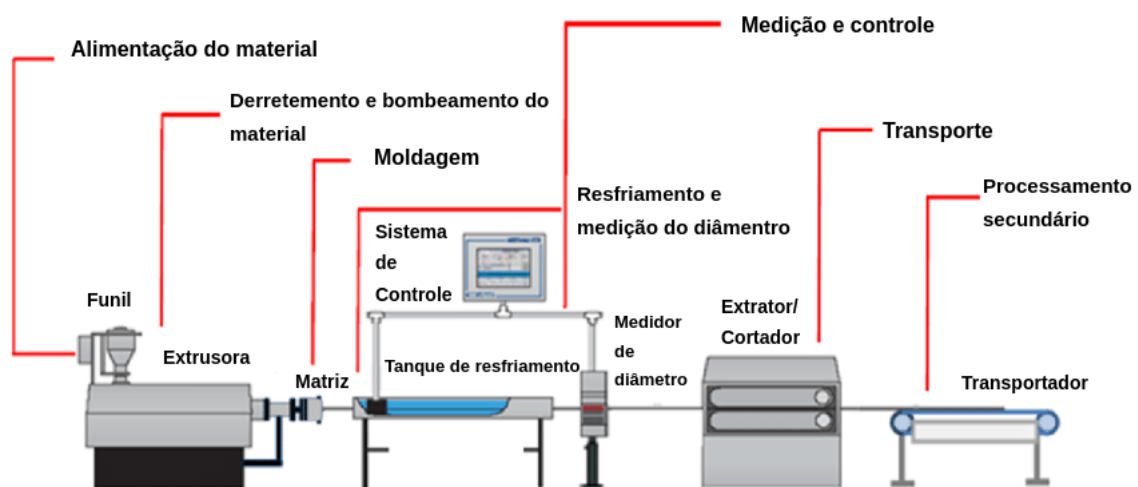
A extrusora é um equipamento cuja sua função é o derretimento e a moldagem de uma matéria-prima sólida, passando-a por uma matriz, o que gera produtos contínuos como tubos,

¹ [...] the process of following a predetermined sequence of operations with little or no human labour, using specialized equipment and devices that perform and control manufacturing processes. [...] Or, automation is the process in industry where various production operations are converted from a manual process, to an automated or mechanized process.

perfis, filmes e filamentos. Inventada em 1797 pelo engenheiro inglês Joseph Bramah (Silva e Ferreira[11], 2023), a máquina extrusora foi aprimorada ao longo dos anos subsequentes, até que, em 1935, foi desenvolvida a primeira extrusora de polímero sintético, por Paul Troester (Rauwendaal[5], 2013).

O processo de extrusão não é feito somente pela extrusora, mas em conjunto com outros equipamentos, como resfriadores, medidores, extratores e transportadores, conforme ilustrado na figura 1. A depender do material fabricado, bem como da infraestrutura, podem ser utilizados mais ou menos equipamentos no processo.

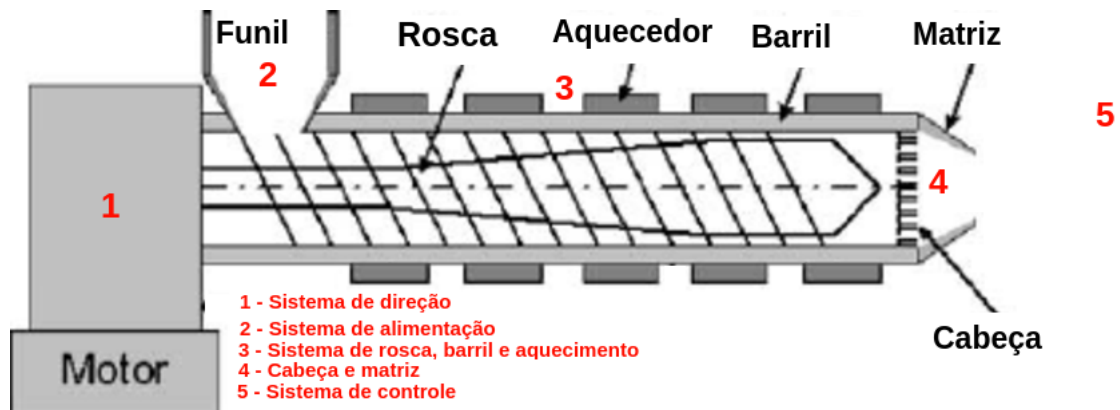
Figura 1 – Diagrama de um processo de extrusão



Fonte: Adaptado do Dillon et al.[12], 2019

Existem diversas variações de máquina extrusora, em que as mais conhecidas são a extrusora com rosca simples e extrusora com rosca dupla. Para Gale[13], a extrusora com rosca simples possui algumas vantagens em relação à extrusora com rosca dupla, como baixo custo, maior robustez e resistência, manutenção mais barata, maior disponibilidade no mercado e maior facilidade na operação (Gale[13], 1997). Giles, Mount e Wagner[14] classificam os componentes principais de uma extrusora com rosca simples da seguinte maneira (Giles, Mount e Wagner[14], 2004):

Figura 2 – Diagrama de uma extrusora de acordo com Giles, Mount e Wagner



Fonte: Adaptado do Tan et al.[15], 2004

- Sistema de direção, composto por motor, caixa de engrenagens, engrenagem principal e caixa de rolamentos;
- Sistema de alimentação, composto por funil de alimentação, garganta e seção alimentadora da rosca;
- Sistema de rosca, barril e aquecimento, onde a resina sólida é empurrado, derretido, misturado e injetado na matriz;
- Cabeça e matriz, onde o extrudado é modelado;
- Sistema de controle, em que o controlador, com suas entradas elétricas e monitores, controla todo o processo de extrusão.

No que diz respeito a matéria-prima, os polímeros mais comumente reaproveitados por meio da extrusão são do tipo termoplástico, que derretem ao serem aquecidos a uma determinada temperatura, mas solidificam após resfriamento, sem mudanças significativas da composição química após o processo de extrusão, o que os torna aptos para reciclagem (Rauwendaal[5], 2013). Os polímeros, no entanto, possuem pontos de fusão distintos entre seus tipos, de acordo com suas características moleculares (Bunn[16], 1955), portanto, a configuração da máquina e o andamento do processo de extrusão variam conforme o tipo de plástico utilizado.

2.2.1 Polímeros recicláveis pelo processo de extrusão

Conforme supracitado, a temperatura de fusão dos polímeros pode variar conforme o tipo do material. Um dos polímeros utilizados em maiores escalas (Sin e Tueen[17], 2023) e que pode ser reciclado por meio da extrusão é o Polietileno Tereftalato, também conhecido como PET. O ponto de fusão deste é 265 °C, e a temperatura de transição vítrea, que consiste na transformação de um estado sólido para um estado de borracha, é de 69 °C. Sobretudo pela sua resistência, a aplicação típica do PET pode ser encontrada nas fitas de gravação magnética, vestimentas e recipientes de bebidas (Callister[18], 2002).

Outro polímero reciclável pela extrusão é o polietileno, comumente utilizado em garrafas flexíveis, componentes de baterias e fitas de embalagens. Tem como característica a resistência química, bem como o isolamento elétrico (Callister[18], 2002). Pode ser de alta densidade, denominado PEAD, como também de baixa densidade, conhecido como PEBD (Ferreira e Santana[19], 2015). O PEAD possui temperatura de fusão de 137 °C, enquanto o PEBD, 115 °C (Callister[18], 2002).

Por fim, pode-se destacar o policarbonato, encontrado principalmente em capacetes de segurança, devido a sua estabilidade dimensional e resistência ao impacto físico. O ponto de fusão é de 265 °C, e de transição vítrea, 150 °C (Callister[18], 2002).

2.3 MICROCONTROLADOR

O microcontrolador é um computador em um circuito único integrado, composto por um processador (CPU), memória de acesso aleatório (RAM), um tipo de memória somente de leitura (ROM) e portas de entrada/saída, projetado originalmente para realizar uma tarefa específica e executar uma única aplicação (Hussain et al.[20], 2016).

Amplamente utilizado em eletrodomésticos, aparelhos de comunicação, periféricos de computadores, equipamentos de entretenimento, aparelhos de reprodução de imagens, equipamentos médicos, dispositivos de vendas e brinquedos (Tanenbaum[21], 2013), os microcontroladores podem atuar na medição, controle, cálculo ou exibição de informações (Axelson[22], 1994, p.1), em conjunto com outros componentes eletrônicos como sensores, motores, relés, *displays* e demais módulos ou acessórios.

2.3.1 Microcontrolador ESP32

ESP32 é uma série de microcontroladores criada e desenvolvida pela empresa chinesa Espressif Systems², mais conhecida pelo baixo consumo de energia e pelas funcionalidades Wi-Fi e Bluetooth, mas, além disso, é resistente à variação térmica, que compreende temperaturas entre -40 °C e 125 °C, e é altamente integrado com interruptores de antena embutidos, baluns, amplificador de potência, amplificador de recepção de baixo ruído, filtros e módulos de gerenciamento de energia. Por essas características, aliadas ao baixo preço, o ESP32 é largamente utilizado em processos de automação industrial, principalmente na implementação de sistemas embarcados e da Internet das Coisas (IoT) (Babiuch e Postulka[23], 2021).

De acordo com a documentação do ESP32³, o microcontrolador possui 48 pinos ao todo, porém somente 30 são acessíveis para os usuários. Desses 30 pinos, 25 são do tipo GPIO⁴, que servem para conectar o microcontrolador com os periféricos. Com exceção dos pinos 34 a 39, os pinos GPIO podem funcionar como entradas ou saídas digitais simples, ou seja, ler e enviar

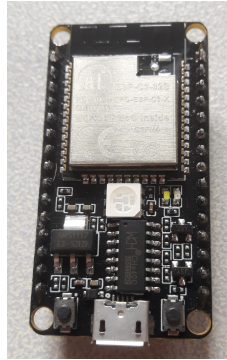
² <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>

³ <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>

⁴ *General Purpose Input Output*

dois estados, ligado ou desligado. Muitos desses pinos, no entanto, são utilizados para outros recursos, como: 18 pinos de entrada analógica, dez pinos com sensores de toque capacitivos, três pinos seriais, 16 pinos PWM⁵, entre outros.

Figura 3 – ESP32-C3 RISC-V NodeMCU



Fonte: Página do ESP32 na Wikipedia⁶

⁵ *Pulse Width Modulation*

⁶ <https://en.wikipedia.org/wiki/ESP32>

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção serão apresentados trabalhos relacionados e suas análises comparativas com o presente trabalho.

3.1 DO PROJETO PSS AO CPS: UM CASO DE USO INDUSTRIAL REAL DIRECIONADO À INDÚSTRIA 4.0

O estudo desenvolvido por Marilungo et al.[24] (2017) destaca a aplicação do CPS¹ ao processo de fabricação, à luz dos conceitos de PSS². Portanto, o seu foco está no desempenho do processo de fabricação perante as implementações tecnológicas. A observação prática deste ensaio se deu em uma empresa italiana de fabricação de tubos de plástico, cujo meio de produção é a extrusão. O CPS foi empregado não só à máquina extrusora, mas a todo o processo de fabricação de tubo, desde a extrusão até o transporte do material resfriado e cortado sob medida.

A pesquisa interpreta o CPS como um PSS aplicado ao nível de fábrica, comparando a relação produto-serviço do primeiro com a relação entre o componente cibernético e o ativo físico do segundo. Em ambas as relações, são observados ativos tangíveis e intangíveis, e o artigo propõe um sistema que envolva estes, com base nos requisitos do usuário. Apresenta, também, uma abordagem metodológica com cinco etapas, que são: análise do processo produtivo atual, mapeamento dos ativos tangíveis e intangíveis, modelagem da infraestrutura de TI, definição do novo processo e a análise dos principais benefícios do CPS.

Diferentemente do Sistema de Controle e Monitoramento para Máquina Extrusora, desenvolvido no presente trabalho, a digitalização do processo empregado por Marilungo et al.[24] não visa a facilidade de controle e acompanhamento por parte dos operadores de máquinas, e sim, o monitoramento mais abrangente e minucioso do processo, bem como a otimização energética e dos recursos utilizados. Outra diferença entre as duas pesquisas está nos equipamentos eletrônicos e softwares utilizados para o acompanhamento do processo. Enquanto o presente trabalho adapta os equipamentos já empregados na máquina extrusora, com sistemas e aplicações concebidos especificamente para esse projeto, a pesquisa do Marilungo et al.[24] utiliza rede de sensores próprios e programa preexistente.

Entretanto, essas diferenças não são excludentes entre si, antes complementares. Com base nas implementações realizadas por Marilungo et al.[24] e a instalação de rede de sensores adicional, o Sistema de Controle e Monitoramento, além de facilitar e otimizar o trabalho dos operadores, viabilizará a introdução de recursos que aumentem o desempenho da própria máquina extrusora.

¹ *Cyber-physical system*: sistema computacional cuja finalidade é o controle das entidades físicas.

² *Product-service system*: modelo de negócios que preza pela oferta da utilidade dos produtos e serviços, mais do que a oferta destes em si.

3.2 ARQUITETURA DE NUVEM PARA A INTERNET DAS COISAS, VOLTADA PARA MONITORAMENTO E CONTROLE REMOTO DE DISPOSITIVOS INDUSTRIAIS

Silva et al.[25] (2016) propõem em seu artigo uma arquitetura para implantação rápida de um sistema de controle e monitoramento remoto, que consiste em uma plataforma baseada em computação em nuvem, aliada aos protocolos industriais padrão e conceitos de IoT³. A computação em nuvem foi empregada para possibilitar a captação e análise de dados sob demanda, e execução de ações de controle. Ou seja, os dados coletados pelos sensores são consumidos pela aplicação, e a partir de análises destes dados, o usuário ou a própria aplicação pode iniciar, alterar ou finalizar um trabalho em curso. Além disso, pode abranger também dados externos ao sistema, como as condições do ambiente.

Na proposta de Silva et al.[25], a arquitetura de nuvens possui três camadas principais, que são: rede de dispositivos sem fio, composto por sensores e atuadores conectados às máquinas e dispositivos do sistema a ser monitorado e controlado; porta de entrada, que converte os dados recebidos da rede de dispositivos sem fio para protocolos de armazenamento em nuvem; e o serviço de nuvem, que disponibiliza esses dados para análise e também possibilita envio de comandos aos atuadores.

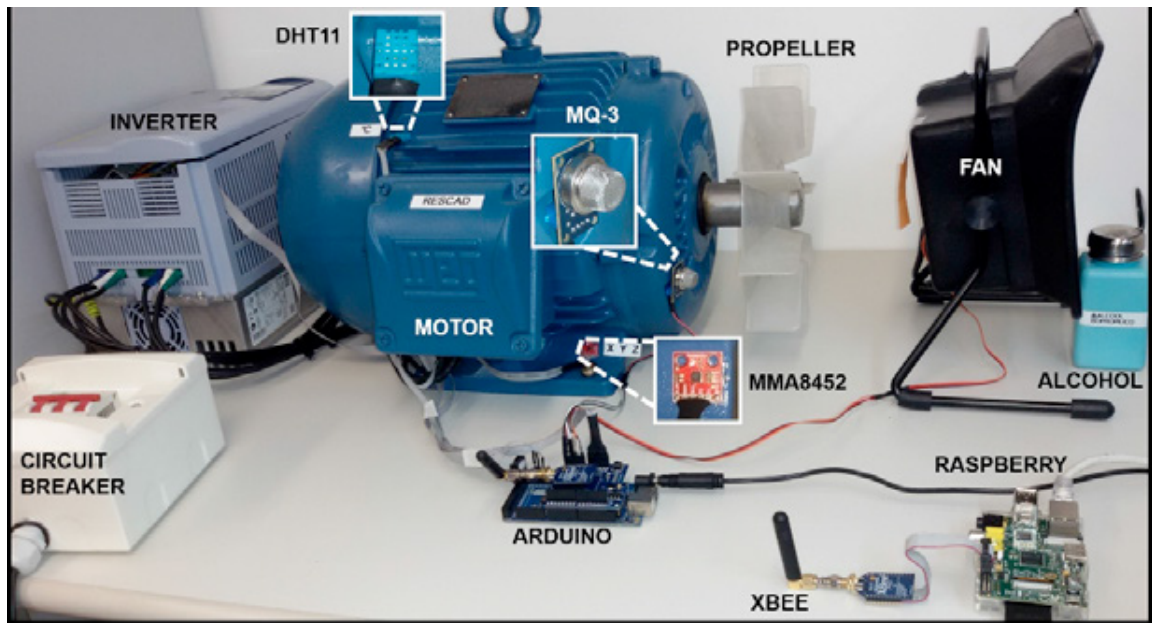
O estudo de caso dessa pesquisa foi elaborado a partir de implementação da arquitetura em um sistema de exaustão industrial. O sistema, este, que era constituído por um motor trifásico de dez cavalos com uma hélice, um inversor de frequência destinado para o controle de velocidade e um dispositivo com sensor para monitoramento de gás ambiente, conectado a um acelerômetro e higrômetro.

Para a conexão com os sensores foi utilizado uma placa arduíno, para a porta de entrada foi empregue um Raspberry Pi (figura 4), e o protocolo de comunicação com a nuvem foi feito por meio do protocolo MQTT⁴. Para o armazenamento de dados, foi utilizado a plataforma IBM Bluemix, que, por sua vez, emprega o Cloudant, um banco de dados NoSQL, assim como uma API RESTful que permite o consumo dos dados armazenados por aplicações externas.

³ *Internet of Things*: uma rede global de objetos que transferem dados e se comunicam entre si, através da internet.

⁴ *Message Queuing Telemetry Transport*

Figura 4 – Visão geral da configuração



(Silva et al.[25], 2016)

O controle e o monitoramento do sistema pelo usuário, então, foi delegado a um aplicativo móvel e uma aplicação web, que permitem o acionamento e interrupção do exaustor, assim como o controle de velocidade deste. Além disso, é possível o monitoramento de informações como a concentração de hidrocarbonetos, temperatura, umidade. Essas aplicações se comunicam com o sistema por meio da API RESTful da nuvem, como citado anteriormente.

A arquitetura é muito semelhante ao do Sistema de Controle e Monitoramento para Máquina Extrusora deste presente trabalho, embora as ferramentas escolhidas sejam diferentes. O projeto de Silva et al.[25] é mais dinâmico na experiência do usuário com o controle e monitoramento remoto, uma vez que oferece duas possibilidades, o aplicativo móvel e a aplicação web. A vantagem do Sistema de Controle e Monitoramento, por sua vez, está na simplicidade do aplicativo, pois possui apenas uma funcionalidade adicional em relação às da própria máquina extrusora, que é a pré-configuração, de modo que mesmo os usuários menos familiarizados com a tecnologia digital poderá assimilar mais facilmente o uso da ferramenta.

4 SISTEMA DE CONTROLE E MONITORAMENTO PARA MÁQUINA EXTRUSORA

O Sistema de Controle e Monitoramento para Máquina Extrusora foi projetado para possibilitar o acompanhamento e manuseio da extrusora à distância, por meio de um aplicativo móvel. Visto que o processo de extrusão requer o uso de diversos equipamentos, desde a máquina extrusora até o transportador, como explicado na seção 2.2 do capítulo 2, o que resulta em ocupação de distância relativamente grande, o controle da extrusora pelo aplicativo pode reduzir a locomoção dos operadores, o que levaria à otimização do tempo e desempenho.

O funcionamento do sistema consiste na leitura de dados da extrusora através dos sensores conectados ao microcontrolador ESP32, que, por sua vez, comunica-se com o aplicativo android, programado em Flutter, por meio do banco de dados Firebase Realtime Database.

4.1 DISPOSITIVOS UTILIZADOS NO SISTEMA DE CONTROLE E MONITORAMENTO

O Sistema de Controle e Monitoramento é destinado para funcionar com a extrusora principal do Projeto Lavoisier. No entanto, sua montagem ainda não foi concluída, de modo que, nesta fase de desenvolvimento do sistema, a máquina não está equipada com seus componentes eletrônicos. Não obstante, foi possível desenvolver o sistema com base na estrutura comum das extrusoras, o que reduziu a informação realmente necessária, que é a quantidade de resistores de aquecimento, pois esta varia conforme o tipo e tamanho da máquina. As demais partes variáveis, cujas características foram presumidas nesta análise, são relativamente de fácil adaptação por parte do sistema, caso haja alguma inconformidade com o equipamento eletrônico real da extrusora.

Com base nos dados coletados, concluiu-se que seriam necessárias conectar à extrusora principal:

- Quatro termostatos com saída analógica, dos quais o sistema deve receber o valor da temperatura captada de seus respectivos resistores de aquecimento aos quais estarão conectados, bem como os valores configurados para atingir a temperatura desejada;
- Além disso, o sistema deve enviar aos termostatos as temperaturas definidas no aplicativo, ou;
- Caso os termostatos não possuam saídas analógicas, quatro sensores de temperatura para funcionar paralelamente aos termostatos;
- Um sensor de velocidade, que deve enviar a velocidade do motor;
- Um controlador de velocidade, adaptado para comunicação externa.

Para que seja possível o controle da máquina extrusora por meio do microcontrolador, serão necessárias adaptações físicas no circuito elétrico da própria máquina, sobretudo com a integração de dispositivos como relés ou transistores, para que o circuito seja aberto ou fechado externamente aos controladores próprios da extrusora. Além da adaptação no circuito, será necessário também implementar um meio de interceptar os dados enviados pelo sensor de velocidade do motor ou, caso não possua o medidor, até mesmo instalar um no sistema de direção.

Como descrito na seção 2.3 do capítulo 2, o microcontrolador ESP32 possui 25 pinos GPIOs, que, com exceção dos pinos 34 a 39, podem funcionar como entradas ou saídas digitais simples. Estas portas podem ser utilizadas para se comunicar com os dispositivos eletrônicos que estarão conectados à extrusora, porém, caso o número de portas não seja suficiente, será necessário o auxílio de um expensor de portas.

A função primária do ESP32 no Sistema de Controle e Monitoramento, entretanto, é a comunicação com a internet, especificamente por meio da rede Wi-Fi. Uma vez que o ESP32 pode ser programado através do Arduino IDE¹, é possível utilizar Wifi.h, a biblioteca responsável pela conexão do microcontrolador em uma rede Wi-Fi. Além da conexão com a rede *wireless*², o ESP32 será responsável também pelo acesso ao banco de dados Firebase Realtime Database, por meio da biblioteca IOXhop-FirebaseESP32.h. O processo de comunicação do microcontrolador ESP32 com o banco de dados será explicado mais adiante.

Em razão da indefinição dos componentes eletrônicos que serão integrados à máquina extrusora principal, foi necessário comparar duas extrusoras distintas disponíveis no IFPI. A primeira extrusora (figura 5) foi adquirida pelo IFPI já fabricada, para o laboratório de química da instituição, e seu termostato é composto por dois displays³ de sete segmentos, uma para indicar a temperatura do aquecedor e outra para indicar a temperatura configurada; e três botões eletrônicos de pulso simples, uma para ativar a configuração da temperatura, uma para o incremento unitário da temperatura, e outra, para o decremento unitário. Além disso, possui um dimmer⁴ para o controle da velocidade do motor, e também um interruptor de emergência. Devido ao alto grau de integração com a máquina, não foi possível identificar a disposição do circuito elétrico no controlador.

¹ Interface de programação do Arduino, uma plataforma de prototipação de projetos eletrônicos.

² Palavra em inglês que significa "sem fio".

³ *Display*: dispositivo para apresentação de informação.

⁴ Dimmer: um dispositivo giratório que regula a intensidade de uma corrente elétrica através da variação de tensão.

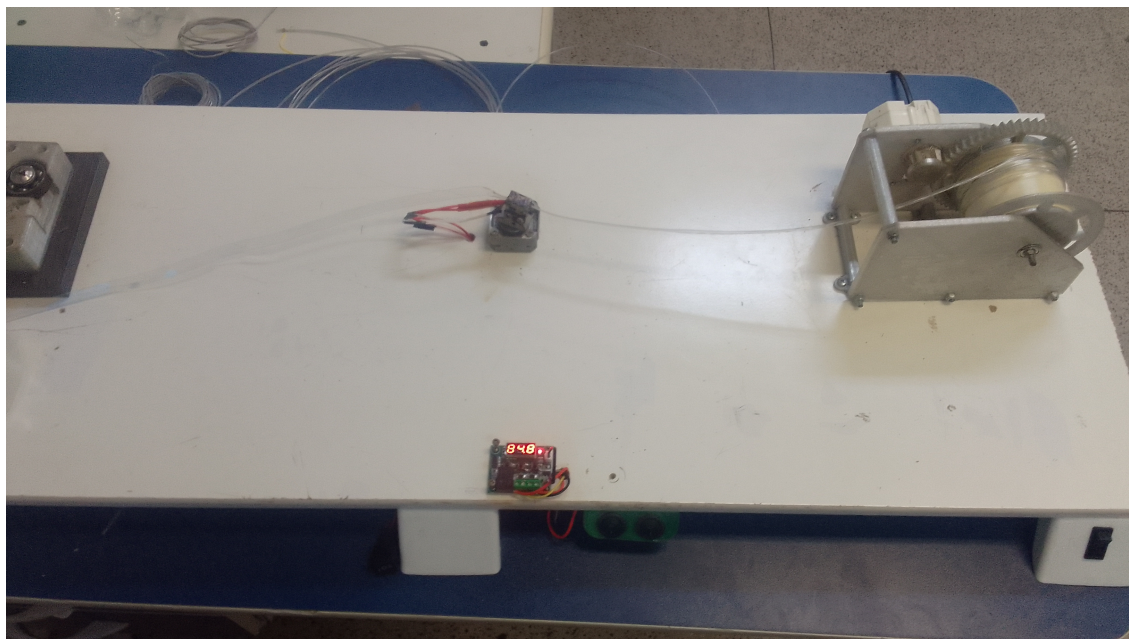
Figura 5 – Extrusora adquirida pelo Projeto Lavoisier



Fonte: De autoria própria

Já a segunda extrusora (figura 6) foi desenvolvida pelos alunos do laboratório LIMS, do IFPI. O termostato utilizado nesta extrusora é o modelo W1209 (figura 7), e possui um único display de sete segmentos, tanto para configuração como para exibição da temperatura do aquecedor, e três botões de pulso simples: uma para ativar a configuração; outra, para incremento unitário da temperatura; e outra, para decremento unitário. Assim como a extrusora supracitada, o controle de velocidade é feito através de um dimmer.

Figura 6 – Extrusora do LIMS



Fonte: De autoria própria

Figura 7 – Termostato W1902



Adaptado do site Mercado Livre⁵

Diferentemente da primeira extrusora, desta vez foi possível identificar a lógica de funcionamento do controlador termostato. O dispositivo possui um sensor de temperatura, e

⁵ Disponível em: <<https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2633417205-termostato-sensor-temperatura-w1209-controlador-cjm>>

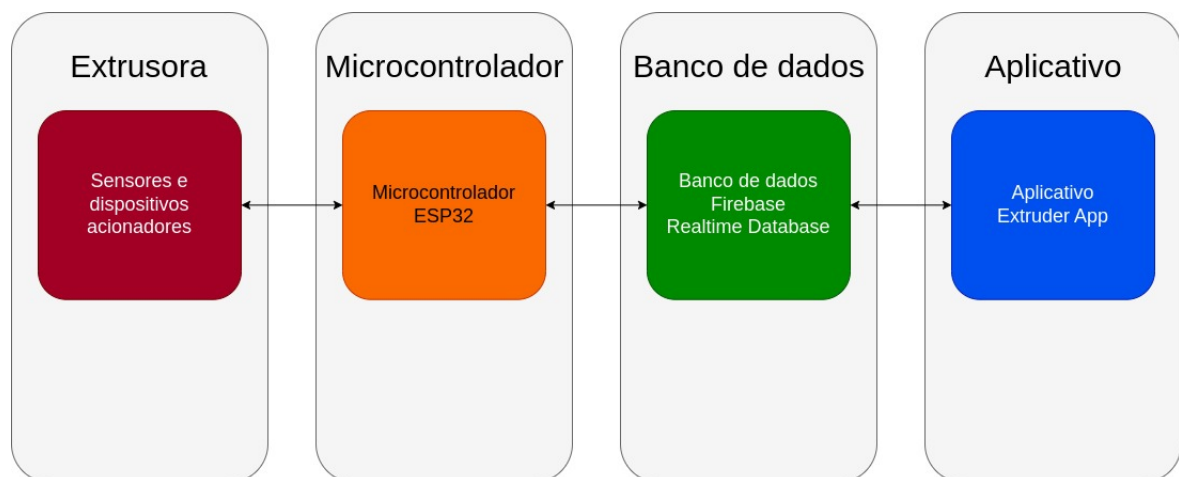
este mede o aquecimento do resistor. O termostato compara continuamente a temperatura do sensor com a margem superior da temperatura definida, e enquanto esta não é atingida, o relé embutido no dispositivo fecha o circuito do aquecedor, de modo a mantê-lo esquentado. Quando finalmente as temperaturas atingem a igualdade, o relé abre o circuito, e o aquecedor deixa de funcionar, o que leva o produto ao esfriamento. O aquecimento é retomado com a detecção da temperatura abaixo da margem inferior definida no termostato. Essa margem é regulável, isto é, a partir da temperatura desejada, pode-se estabelecer unidades de temperatura superior e inferior, e o controle do aquecedor leva-se em consideração esses valores, para que a temperatura média sempre esteja próximo da temperatura desejada.

Desse modo, foi possível idealizar o controle da temperatura por meio do microcontrolador, com base nas características dos dois termostatos estudados. Para controlar a máquina extrusora principal, o microcontrolador agirá paralelamente ao circuito original por meio dos sensores e relé, obedecendo a mesma lógica aplicada na segunda extrusora.

4.2 ESQUEMATIZAÇÃO DA ESTRUTURA GERAL DO SISTEMA DE CONTROLE E MONITORAMENTO

O Sistema de Controle e Monitoramento para Máquina Extrusora foi estruturado em quatro principais grupos: extrusora, microcontrolador, banco de dados e aplicativo (figura 8).

Figura 8 – Estrutura geral do Sistema de Controle e Monitoramento



Fonte: De autoria própria

Enquanto a extrusora e o aplicativo são as partes finais do sistema, isto é, de onde os dados são originados e para onde eles são destinados, microcontrolador e banco de dados intermedeiam esse processo. A seguir, será explicada a comunicação entre cada um desses grupos.

4.2.1 Comunicação entre a extrusora e o microcontrolador

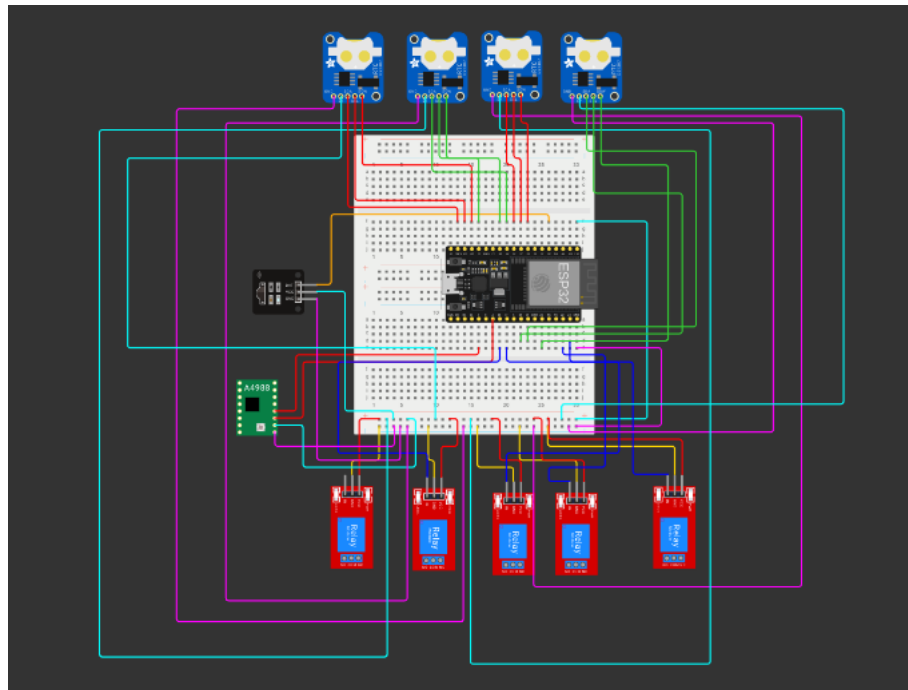
Na seção 4.1, ficou definido que serão utilizados os seguintes componentes eletrônicos na extrusora principal: quatro termostatos com saída analógica ou quatro sensores de temperatura, um sensor de velocidade e um controlador de velocidade. A partir disso, foi possível identificar a quantidade total de pinos de conexão entre os dispositivos eletrônicos e o microcontrolador ESP32. Na figura 9, é representada a comunicação do ESP32 com os todos os módulos e dispositivos que serão utilizados.

Caso sejam instalados termostatos com saída analógica, terá um ou dois pontos de conexão com o ESP32. Como são quatro termostatos, a quantidade total de pinos para a comunicação com o microcontrolador pode variar entre quatro e oito. Se, no entanto, os termostatos instalados não possuam saída analógica, então, será utilizado um sensor de temperatura adicional para cada. Tomando como base o módulo arduíno MAX6675, utilizado para transmitir dados obtidos pelo sensor de temperatura aos microcontroladores, são necessárias três portas GPIO para cada módulo. Visto que são quatro sensores, a quantidade total de pinos necessários será 12.

Outros pontos de conexão necessários são do controlador de velocidade, sensor de velocidade e relés. Com base no driver L298N, o controlador de velocidade, para controlar um único motor, em uma única direção, são requisitados dois pinos, um digital e outro PWM⁶. Já para o sensor de velocidade, tomando como referência o módulo Encoder, necessita de apenas um pino, que pode ser digital ou analógico. Por fim, o relé também opera com apenas um pino digital. Como são cinco relés previstos, quatro para temperatura e um para o motor, são necessários cinco pinos ao todo. Portanto, são 16 pinos do ESP32 utilizados para se comunicar com os dispositivos periféricos.

⁶ Sigla em inglês para Pulse Width Modulation, que significa "modulação por largura de pulso". Serve para controlar a tensão.

Figura 9 – Representação esquemática das conexões ESP32 com dispositivos periféricos



Fonte: De autoria própria

4.2.2 Firebase Realtime Database

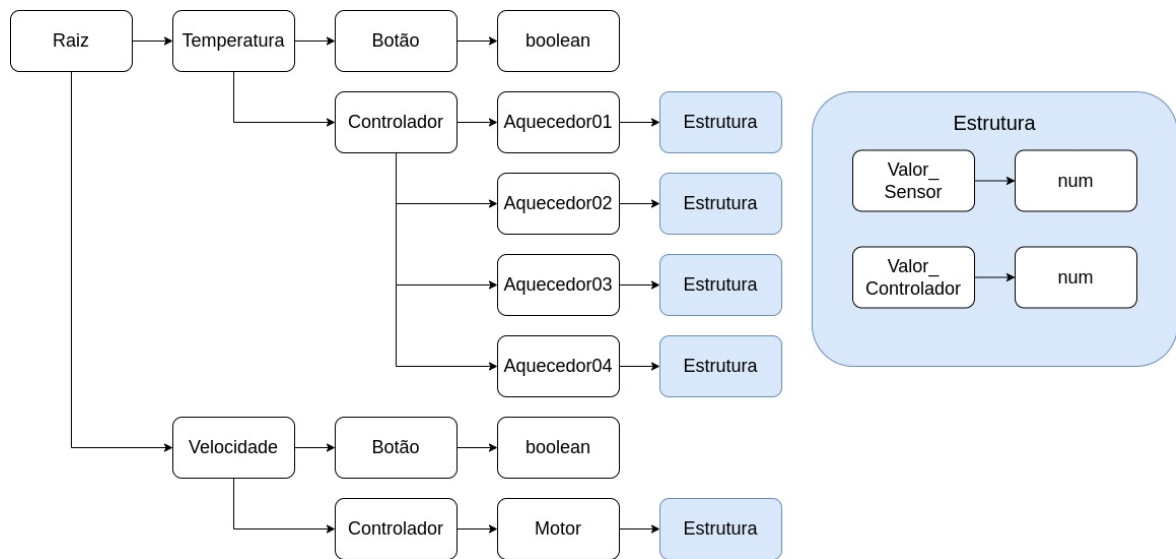
O banco de dados é a parte do sistema responsável pela comunicação entre o aplicativo móvel e o microcontrolador. Para o Sistema de Controle e Monitoramento, foi escolhido o Firebase Realtime Database para realizar esta tarefa, principalmente por este ser voltado para aplicações sincronizadas em tempo real. De acordo com a documentação⁷, o Realtime Database não utiliza requisições HTTP típicas, e sim, a sincronização de dados, em que o banco, ao perceber alterações em seus dados, atualiza os dispositivos conectados em milissegundos. Esta qualidade é fundamental, visto que a latência da troca de informações entre o aplicativo e a máquina extrusora deve ser a menor possível.

O Realtime Database é um banco de dados NoSQL⁸, e o armazenamento de dados é feito numa árvore JSON. Assim, os dados do sistema ficarão organizadas conforme o diagrama presente na figura 10.

⁷ Disponível em: <<https://firebase.google.com/docs/database?hl=pt-br>>

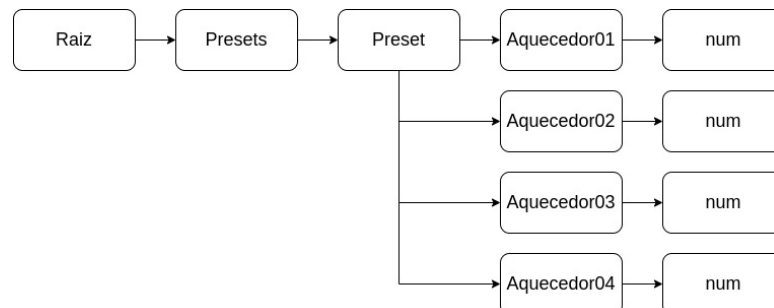
⁸ NoSQL: Banco de dados não relacional.

Figura 10 – Diagrama de dados armazenados no Realtime Database



Fonte: De autoria própria

Figura 11 – Diagrama de pré-configurações salvas no Realtime Database



Fonte: De autoria própria

A árvore JSON foi subdividida de modo que as últimas chaves e valores de cada subárvore sejam referentes ao estado de um componente eletrônico da extrusora. Embora os dados precisem ser manipulados e tratados pelo microcontrolador ESP32 para que possa estabelecer a comunicação de fato entre a máquina extrusora e o aplicativo, os valores são organizados na nuvem de modo que seja possível visualizar conforme os componentes eletrônicos estão dispostos fisicamente.

No caso da subárvore “Preset”, esta não comunica com o microcontrolador, e sim, somente com o aplicativo. Tem como função o armazenamento das pré-configurações de temperaturas para um determinado material polimérico, de modo que possa carregar instantaneamente os valores no aplicativo quando requisitado.

Uma vez que são instaladas no aplicativo e no ESP32 suas respectivas bibliotecas Firebase, é possibilitado a ambas as aplicações o acompanhamento ininterrupto do estado do

banco de dados.

4.3 EXTRUDER APP

Extruder App, o aplicativo móvel desenvolvido para o Sistema de Controle e Monitoramento para Máquina Extrusora, foi programado em Flutter. É composto de página única, pela qual pode ser feito o acompanhamento e controle de todos os componentes da extrusora aos quais estão conectados. Com exceção do controlador de velocidade, a interface da aplicação se aproxima das características originais dos componentes eletrônicos associados .

Para o controle dos interruptores, foram empregados os *toggle switches*⁹, que possuem dois estados: ligado e desligado. Seu estado é alterado ao deslizar o dedo ou ao apertar o lado desejado do botão (figura 12). Embora o interruptor físico, que é um botão de pulso simples, por si só, não indique o estado da máquina após deixar de ser pressionado, geralmente as máquinas com esse modelo de interruptor possuem uma lâmpada ou outro indicador que altera o seu estado enquanto o aparelho estiver ligado. Assim, os *toggle switches* são, ao mesmo tempo, modificadores do estado e também indicadores. A fim de garantir a segurança do funcionamento da máquina e a consistência de dados, os controladores de temperatura e velocidade só são exibidos quando o estado dos interruptores estiverem ativados (figuras 13 e 14).

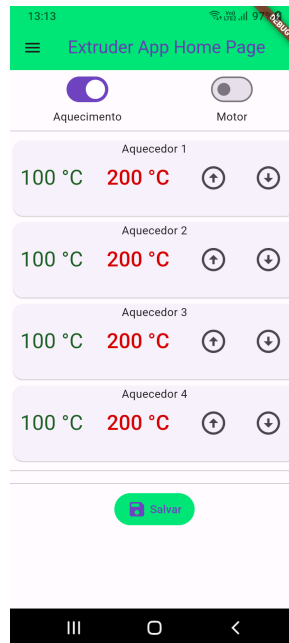
Figura 12 – Página principal do aplicativo Extruder App com os interruptores desligados



Fonte: De autoria própria

⁹ *Toggle switch*: palavra em inglês que significa "interruptor".

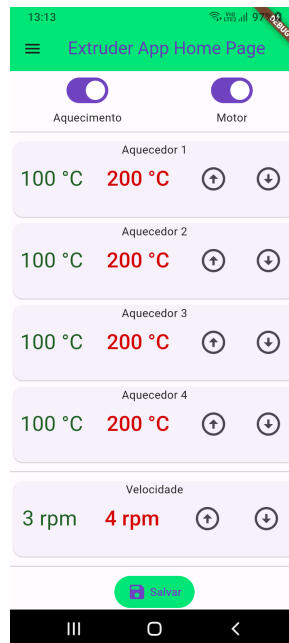
Figura 13 – Página principal do aplicativo Extruder App com o interruptor dos aquecedores ligado



Fonte: De autoria própria

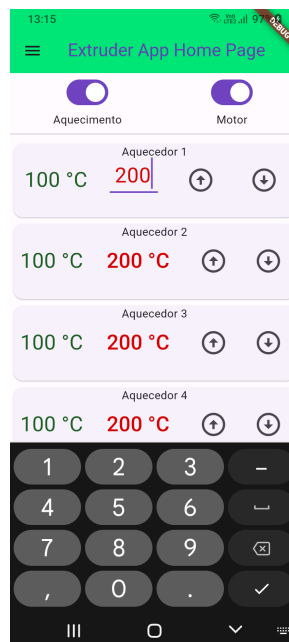
O controle e acompanhamento dos termostatos, por sua vez, é completamente fiel ao dos componentes físicos. Com dois indicadores de temperatura, um do sensor e outro do controlador, o aplicativo reproduz numericamente a disposição dos displays de sete segmentos. Do mesmo modo, os botões de incremento e decremento unitário da temperatura funcionam de forma idêntica a dos botões de pulso simples, ao alterar o estado enquanto pressionado e retornar ao estado anterior com o fim da ação. As ações com os botões manipulam o valor da temperatura de controle, e este, por sua vez, é gravado na nuvem. Além dos botões de incremento e decremento, é possível definir diretamente a temperatura desejada, digitando o valor (figura 15). Quanto às operações do aplicativo relacionadas ao controle e monitoramento de velocidade, são as mesmas de temperatura (figura 14).

Figura 14 – Página principal do aplicativo Extruder App com os interruptores ligados



Fonte: De autoria própria

Figura 15 – Definição do valor da temperatura através da digitação

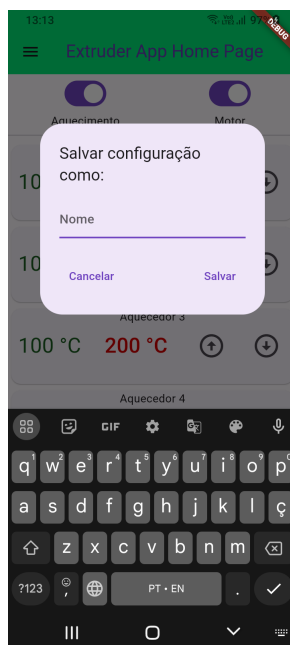


Fonte: De autoria própria

O aplicativo possui também uma opção para salvar as pré-configurações dos aquecedores. Ao pressionar o ícone “salvar”, é exibida uma janela pop-up para salvar o estado da temperatura de controle de cada aquecedor (figura 16). E a configuração salva é listada no drawer, que é acessado ao clicar no ícone tracejado no canto superior esquerdo da interface (figura 17). Ao

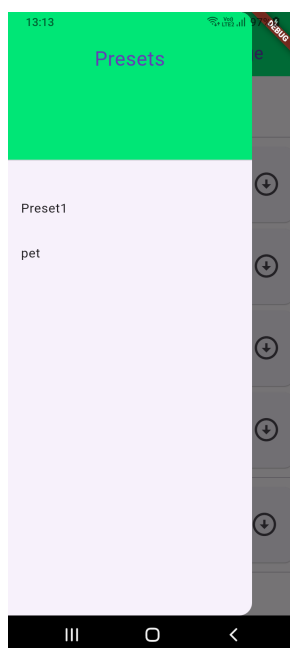
selecionar a pré-configuração, instantaneamente as temperaturas de controle dos aquecedores são substituídas pelos valores salvos. E, ainda, essas pré-configurações podem ser excluídas ao deslizar o item à esquerda (figura 18).

Figura 16 – Janela de confirmação para salvar a pré-configuração



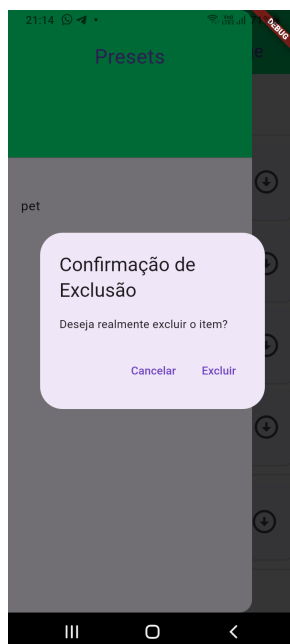
Fonte: De autoria própria

Figura 17 – Pré-configurações listadas no drawer



Fonte: De autoria própria

Figura 18 – Confirmação da exclusão da pré-configuração



Fonte: De autoria própria

5 RESULTADOS

Para a verificação do funcionamento do Sistema de Controle e Monitoramento para Máquina Extrusora, foi montada uma estrutura reduzida de dispositivos eletrônicos utilizando os seguintes itens (figura19): microcontrolador ESP32; quatro sensores de temperatura, compostos por termopar tipo K e módulo MAX6675; um módulo sensor óptico Encoder; e um motor DC¹ com disco de 20 furos e movido a uma bateria de 9 V; um driver ponte H L298N; quatro LEDs² acompanhados de resistores; e uma fonte ajustável para energizar todo o circuito. Os aparelhos eletrônicos foram disponibilizados em relação ao ESP32 conforme a figura 20.

Figura 19 – Estrutura reduzida de dispositivos eletrônicos

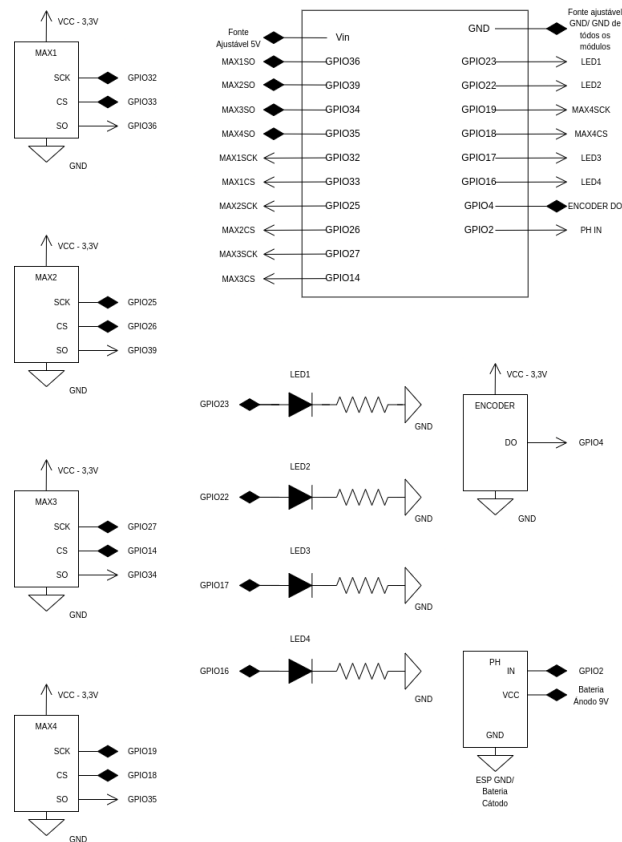


Fonte: De autoria própria

¹ Motor de corrente contínua.

² Sigla para a expressão inglesa “Light Emitting Diode”, que significa “Diodo Emissor de Luz”.

Figura 20 – Diagrama esquemático do ESP32 e os dispositivos periféricos



Fonte: De autoria própria

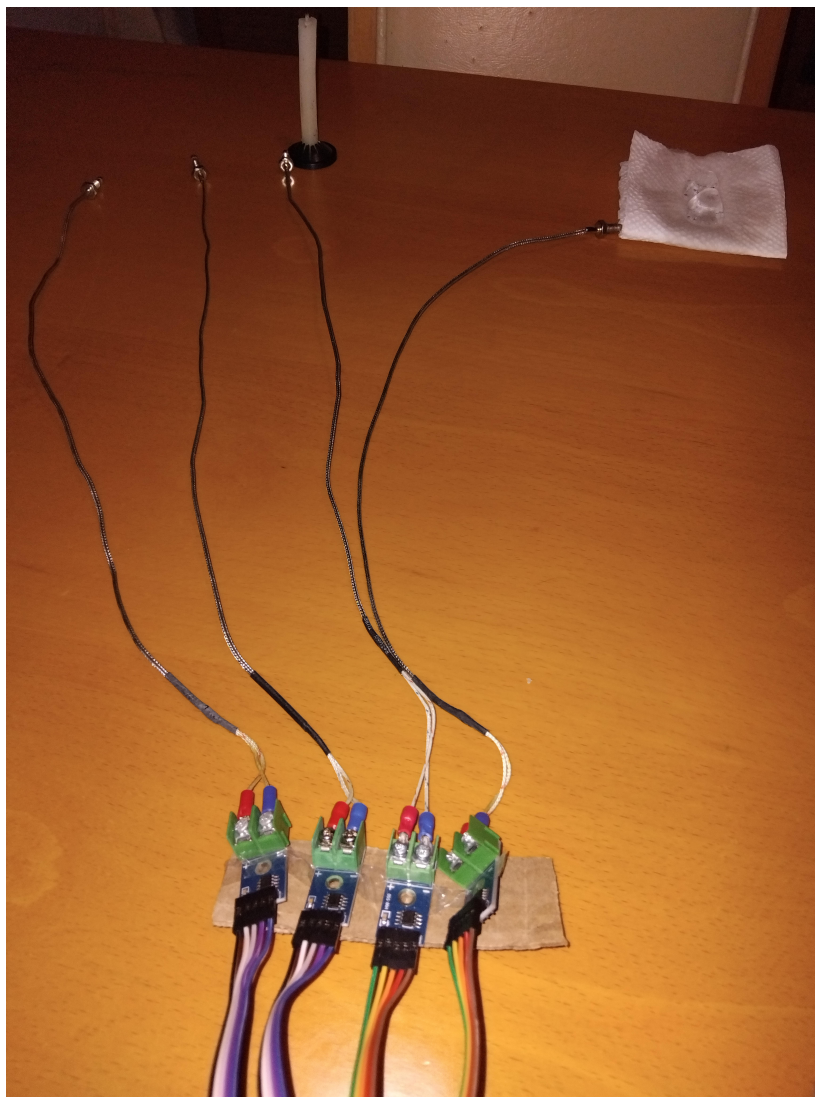
Embora o ESP32 possua um pino para fornecer a tensão de 3,3 V aos dispositivos periféricos, este não foi utilizado devido à corrente operacional ter o limite máximo suportado de 500 mA. A corrente máxima calculada do circuito é de 323 mA, resultante da soma dos seguintes fatores: 50 mA de cada módulo MAX6675, ou seja, 200 mA para os quatro módulos; 7 mA de cada LED com resistor de 390 ohms, ou seja, 28 mA para os quatro LEDs; 15 mA do módulo Encoder; e a corrente operacional de 80mA do próprio microcontrolador ESP32. O driver ponte H L298N não foi contabilizado, uma vez que este é energizado pela bateria de 9 V. Ainda que os 323 mA estejam abaixo do limite máximo de 500 mA, optou-se pelo emprego da fonte ajustável de 700 mA para reduzir os riscos de danificação dos dispositivos.

Ao montar a estrutura, ligar o circuito e acionar os sistemas de motor e aquecimento pelo aplicativo, verificou-se o funcionamento de todos os dispositivos conectados ao microcontrolador, bem como a sua comunicação com o aplicativo. Os campos indicadores das temperaturas e da velocidade se mantiveram em contínua atualização com os dados captados pelos seus respectivos sensores. Assim como o driver ponte H, que iniciou a rotação do motor ao fechar o circuito com a bateria de 9V associada a ele.

A fim de observar os comportamentos dos sensores de temperatura quanto à coerência com a lógica programada no ESP32, isto é, o acionamento dos aquecedores com base na

temperatura indicada no aplicativo, utilizou-se uma vela acesa e dois blocos de gelo para controlar a temperatura captada por cada sensor (figura21). Como o microcontrolador foi programado de modo que tanto a margem superior quanto a margem inferior seja de 5 °C de diferença em relação à temperatura definida, os aquecedores seriam acionados enquanto não atingir 5 °C acima do valor definido no aplicativo, e, ao serem desligados após superar a margem superior, só voltaria a ser acionada após atingir 5 °C abaixo da temperatura indicada.

Figura 21 – Sensores de temperatura

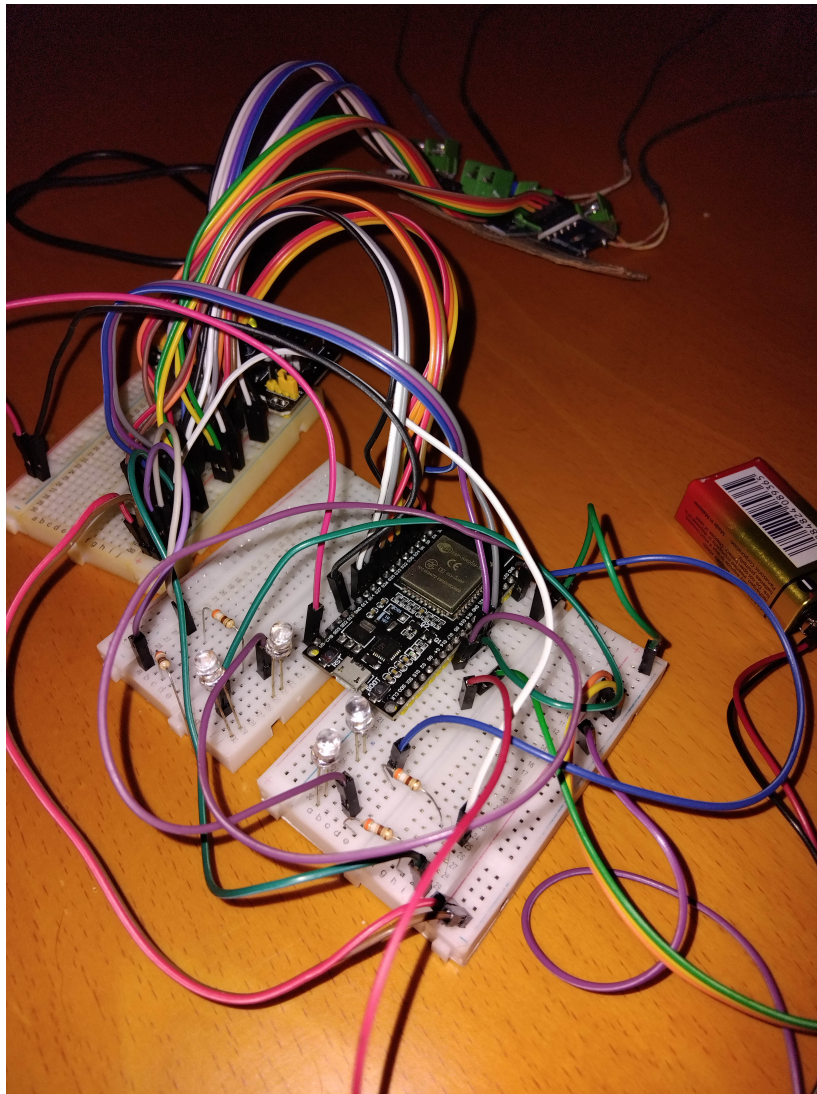


Fonte: De autoria própria

Devido à indisponibilidade de meios de aquecimento real, os módulos relés que seriam utilizados na implementação real foram substituídos pelos LEDs (figura22). Ao experimentar o desempenho da funcionalidade, para atestar a independência de cada sensor, definiu-se valores diferentes para cada aquecedor: 60 °C, 70 °C, 80 °C e 90 °C para os aquecedores 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Deste modo, ao esquentar os termopares com a chama da vela, observou-se que o aquecedor 1 manteve o LED aceso até o sensor indicar o valor de 68 °C; o aquecedor 2,

por sua vez, até 82 °C; o aquecedor 3, aos 91 °C; e o aquecedor 4, até atingir 103 °C. Ao esfriar os termopares com os blocos de gelo, o LED do aquecedor 4 acendeu quando atingiu 82 °C; do aquecedor 3, aos 68 °C; do aquecedor 2, por sua vez, aos 61 °C; e o aquecedor um, ao atingir 49 °C. Portanto, o controle e monitoramento do sistema de aquecimento se mostrou totalmente eficaz.

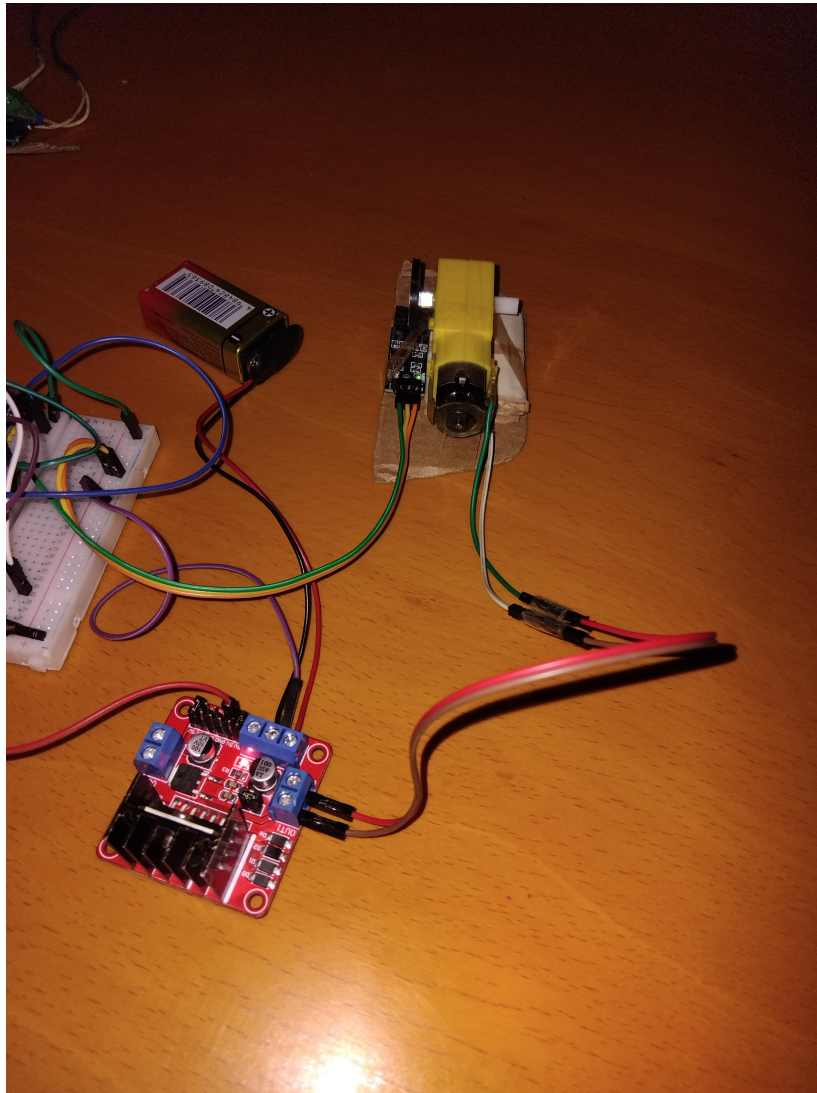
Figura 22 – LEDs conectados ao ESP32 para indicar os estados dos aquecedores



Fonte: De autoria própria

Já a observação do sistema de controle do motor (figura23) consistiu basicamente na leitura da velocidade do motor pelo sensor óptico, e verificou-se que o motor aumenta ou reduz a velocidade conforme aumento ou diminuição do valor definido no aplicativo. No entanto, os dados retornados pelos sensores apresentaram instabilidade, de modo que os valores captados de um motor definido a 240 RPM variavam entre 60 e 240 RPM, e em outros momentos retornava valor nulo. Em suma, o controle da velocidade se mostrou eficaz, porém a leitura pelo sensor se mostrou falha.

Figura 23 – Os dispositivos para controle e monitoramento do motor elétrico



Fonte: De autoria própria

Por fim, quanto ao desempenho do aplicativo Extruder App, todas as funcionalidades implementadas responderam corretamente, seja ao ligar e desligar os sistemas de aquecimento e de motor, seja ao definir novos valores para cada aquecedor, tanto por meio de digitação quanto pelo uso de botões, e também ao indicar os valores dos sensores recebidos da nuvem Firebase. As funcionalidades para criação, uso e exclusão de pré-configurações também se mostraram eficazes.

6 CONCLUSÃO

O Sistema de Controle e Monitoramento para Máquina Extrusora visa, sobretudo, avançar a reciclagem de materiais poliméricos através da extrusão, com a otimização do processo por meio da automação de baixo custo. Para tanto, o presente trabalho realizou estudos sobre o processo de extrusão e o funcionamento da máquina extrusora, bem como os requisitos para possibilitar o controle à distância dos dispositivos da máquina, além de esquematizar, desenvolver e experimentar uma solução prática para o problema proposto.

Os resultados obtidos no estudo indicam a possibilidade real de implementar a automação do processo de extrusão a baixo custo, visto que todos os comandos enviados pelo aplicativos foram corretamente executadas pelo microcontrolador, e, com exceção da falha na leitura da velocidade, os dados dos sensores puderam ser enviadas ao aplicativo. As demais questões em aberto são decorrentes da indisponibilidade de dispositivos específicos, mas que podem facilmente ser adquiridos e implementados, sem afetar a viabilidade técnica ou financeira.

Cabe observar, no entanto, que ainda há muitas indefinições, sobretudo no que diz respeito à adaptação dos dispositivos próprios da máquina extrusora. O experimento desenvolvido no presente trabalho utiliza sensores independentes para a medição das temperaturas e da velocidade, e o mecanismo de ativação dos aquecedores especifica somente a ativação dos módulos relés, não sendo possível visualizar como estes, por sua vez, atuarão sobre o mecanismo de ativação dos dispositivos eletrônicos da máquina. A menos que o instrumento seja montado já visando a automação, empregando dispositivos que facilitem a comunicação externa, podem ser encontrados empecilhos para estabelecer a conexão entre os dispositivos de controle à distância e os dispositivos próprios da extrusora. É necessário maior estudo acerca desse problema para averiguar a possibilidade de popularização da solução proposta pelo Sistema de Controle e Monitoramento.

Em suma, embora ainda haja incertezas, é válido, meritório e até mesmo necessário o aprofundamento no estudo sobre automação do processo de extrusão, uma vez que a solução, de fato, pode contribuir notavelmente no combate aos danos causados pela dificuldade de descarte e tratamento dos resíduos poliméricos.

REFERÊNCIAS

- 1 HOSLER, D.; BUCKETT, S. L.; TARKANIAN, M. J. Prehistoric polymers: Rubber processing in ancient mesoamerica. *Science*, v. 284, n. 5422, 1999. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/science.284.5422.1988>>. Acesso em: 25 jun. 2023. Citado na página 12.
- 2 COLE, M. et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, v. 62, n. 12, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>>. Acesso em: 25 jun. 2023. Citado 3 vezes nas páginas 12, 13 e 14.
- 3 GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, Science, v. 3, n. 7, 2017. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1700782>>. Acesso em: 26 jun. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 14.
- 4 MUGGERIDGE, A. et al. Recovery rates, enhanced oil recovery and technological limits. *Philosophical Transactions A, The Royal Society*, v. 372, n. 2006, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0320>>. Acesso em: 26 jun. 2023. Citado na página 12.
- 5 RAUWENDAAL, C. *Polymer Extrusion*. [S.l.]: Hanser, 2013. ISBN 978-1-56990-516-6. Citado 3 vezes nas páginas 13, 16 e 17.
- 6 GROOVER, M. P. *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. [S.l.]: Pearson College Div, 2007. ISBN 9780132393218. Citado 3 vezes nas páginas 13, 14 e 15.
- 7 DONG, C.-D. et al. Polystyrene microplastic particles: In vitro pulmonary toxicity assessment. *Journal of Hazardous Materials*, Elsevier, v. 385, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121575>>. Acesso em: 27 jun. 2023. Citado na página 14.
- 8 D'ANGELO, S.; MECCARIELLO, R. Microplastics: A threat for male fertility. *Int J Environ Res Public Health*, MDPI, v. 18, n. 5, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ijerph18052392>>. Acesso em: 27 jun. 2023. Citado na página 14.
- 9 GUPTA, A.; ARORA, S. *Industrial Automation*. [S.l.]: University Science Press, 2007. ISBN 9788131805923. Citado na página 15.
- 10 ROGGIA, L.; CARDOZO, R. *Automação Industrial*. [S.l.]: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2016. ISBN 9788594500014. Citado na página 15.
- 11 SILVA, A. de A.; FERREIRA, A. F. Extrusora de plástico e inversor de frequência. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 9, n. 2, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.51891/rease.v9i2.8527>>. Acesso em: 28 jun. 2023. Citado na página 16.
- 12 DILLON, B. et al. The influence of low shear microbore extrusion on the properties of high molecular weight poly(l-lactic acid) for medical tubing applications. *Polymers*, v. 11, p. 710, 04 2019. Citado na página 16.

- 13 GALE, M. Compounding with single-screw extruders. *Advances in polymer technology*, v. 16, n. 4, 1997. Citado na página 16.
- 14 GILES, H. F.; MOUNT, E. M.; WAGNER, J. R. *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*. [S.l.]: William Andrew, 2004. ISBN 9780815517115. Citado na página 16.
- 15 TAN, L. et al. Soft computing applications in dynamic model identification of polymer extrusion process. *Applied Soft Computing*, v. 4, p. 345–355, 09 2004. Citado na página 17.
- 16 BUNN, C. The melting points of chain polymers. *Journal of Polymer Science*, v. 16, n. 82, 1955. Citado na página 17.
- 17 SIN, L. T.; TUEEN, B. S. *Plastics and Sustainability*. [S.l.]: Elsevier, 2023. ISBN 9780128244890. Citado na página 17.
- 18 CALLISTER, W. D. *Ciência De Engenharia De Materiais: Uma Introdução*. [S.l.]: Ltc, 2002. ISBN 8521612885. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- 19 FERREIRA, R. L. R.; SANTANA, R. M. C. Estudo comparativo da influência da razão de sopro nas propriedades de filmes tubulares de pebd e pead. *Polímeros*, Associação Brasileira de Polímeros, v. 25, n. 1, p. 83–93, Jan 2015. ISSN 0104-1428. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0104-1428.1618>>. Citado na página 18.
- 20 HUSSAIN, A. et al. Programming a microcontroller. *International Journal of Computer Applications*, Foundation of Computer Science, v. 155, n. 5, 2016. Citado na página 18.
- 21 TANENBAUM, A. *Organização Estruturada de Computadores*. Pearson Universidades, 2013. ISBN 9788581435398. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=q9vBjwEACAAJ>>. Citado na página 18.
- 22 AXELSON, J. *The Microcontroller Idea Book*. [S.l.]: Lakeview Research, 1994. ISBN 978-0965081900. Citado na página 18.
- 23 BABIUCH, M.; POSTULKA, J. Smart home monitoring system using esp32 microcontrollers. In: MARQUEZ, F. P. G. (Ed.). *Internet of Things*. [S.l.]: IntechOpen, 2021. Citado na página 18.
- 24 MARILUNGO, E. et al. From pss to cps design: A real industrial use case toward industry 4.0. *Procedia CIRP*, v. 64, p. 357–362, 2017. ISSN 2212-8271. 9th CIRP IPSS Conference: Circular Perspectives on PSS. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117301518>>. Citado na página 20.
- 25 SILVA, A. F. da et al. A cloud-based architecture for the internet of things targeting industrial devices remote monitoring and control. *IFAC-PapersOnLine*, v. 49, n. 30, p. 108–113, 2016. ISSN 2405-8963. 4th IFAC Symposium on Telematics Applications TA 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316325885>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

ANEXO A – CÓDIGOS DAS APLICAÇÕES

No repositório github "Projeto_Extrusora" estão todos os códigos escritos para este trabalho.

Disponível em: <https://github.com/Lucakurotaki/Projeto_Extrusora>.