

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ROGER WILLIANS BAPTISTA ONUKA
GRR20137332**

**PROJETO DE AUTOMAÇÃO DE SERVOMOTOR PARA PRENSAS
HIDRÁULICAS EXCÊNTRICAS**

**CURITIBA
2024**

ROGER WILLIANS BAPTISTA ONUKA
GRR20137332

***PROJETO DE AUTOMAÇÃO DE SERVOMOTOR PARA PRENSAS
HIDRÁULICAS EXCÊNTRICAS***

Trabalho apresentado como requisito parcial para a obtenção do Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Departamento de Engenharia Elétrica do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Professor orientador: Carlos Gabriel Bianchin, Dr.

CURITIBA
2024

Resumo em Português

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) descreve o desenvolvimento de um sistema de automação para prensas hidráulicas excêntricas, com o objetivo de aumentar a eficiência e a segurança na indústria. O sistema utiliza um microcontrolador MSP430 para controlar três motores de passo e um relé, que acionam os mecanismos de alimentação da prensa. A segurança é garantida por sensores de presença e um botão de emergência, que interrompem o ciclo de operação em caso de risco. O projeto inclui o dimensionamento dos componentes, a programação do microcontrolador e a construção de um protótipo funcional. Os resultados dos testes demonstram a viabilidade do sistema, com melhorias na precisão, segurança e eficiência em comparação com a operação manual. O trabalho contribui para a modernização da indústria, alinhando-se com os princípios da Indústria 4.0 e promovendo a segurança dos trabalhadores.

Abstract in English

This undergraduate thesis describes the development of an automation system for eccentric hydraulic presses, aiming to increase efficiency and safety in the industry. The system utilizes an MSP430 microcontroller to control three stepper motors and a relay, which actuate the press feeding mechanisms. Safety is ensured by presence sensors and an emergency button, which interrupt the operation cycle in case of risk. The project includes component dimensioning, microcontroller programming, and the construction of a functional prototype. Test results demonstrate the viability of the system, with improvements in accuracy, safety, and efficiency compared to manual operation. This work contributes to the modernization of the industry, aligning with the principles of Industry 4.0 and promoting worker safety.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIMAQ: Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos
ABINEE: Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ADC: Conversor Analógico-Digital
BNDES: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CLP: Controlador Lógico Programável
CNC: Controle Numérico Computadorizado
CNI: Confederação Nacional da Indústria
EMI: Interferência Eletromagnética
FCEM: Força Contraeletromotriz
FIESP: Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
GPIO: General Purpose Input/Output (Entrada/Saída de Uso Geral)
HAL: Hardware Abstraction Layer (Camada de Abstração de Hardware)
IHM: Interface Homem-Máquina
INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IoT: Internet das Coisas
MSP430: Microcontrolador de baixo consumo da Texas Instruments
NBR: Norma Brasileira
PWM: Pulse-Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)
QFN: Quad Flat No-leads (Encapsulamento Quadrado Plano Sem Pinos)
SENAI: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
STEP: Sinal de pulso para avançar o motor de passo
TVS: Transient Voltage Suppressor (Supressor de Tensão Transitória)
UVLO: Under Voltage Lockout (Bloqueio por Subtensão)
VDD: Tensão de alimentação digital
VMOT: Tensão de alimentação do motor
VRRM: Voltage Reverse Repetitive Maximum (Tensão Reversa Repetitiva Máxima)

LISTA DE TABELAS, FIGURAS E GRÁFICOS

Figura 1: Modelo da prensa excêntrica Pneumática, com acionamento por pedal ;

Figura 2: Arquitetura Estratégica de Dados (no trabalho de Eduardo Magrani, pela FGV) ;

Figura 3: Diagrama de funcionamento da máquina;

Figura 4: Diagrama do circuito elétrico (datasheet do chip A4988);

Figura 5: Diagrama do circuito elétrico de ligação (retirado do site do Arduino);

Figura 6: Tabela de funcionamento da saída MS1, MS2 e MS3 do A4988 (Diagrama do A4988);

Figura 7: Diagrama de funcionamento do processo de alimentação automática (Autoria própria) ;

Figura 8: Diagrama Unifilar do sistema de de automação da prensa excentrica(Autoria própria);

Figura 9: Diagrama do circuito, com o microcontrolador, as pontes H's e os acionadores (Autoria própria);

Lista de Tabelas:

Tabela 1 de funcionamento da saída MS1, MS2 e MS3 do A4988 ;

Tabela 2 de Tempo Médio por Etapa do Ciclo;

Tabela 3 de Precisão do Sistema ;

Tabela 4 de Consumo de Energia por Ciclo ;

Introdução

No século XIX, a economia brasileira era predominantemente agrária e dependia fortemente do trabalho escravo, com o açúcar, café e algodão como principais produtos de exportação. Esse sistema de produção rudimentar concentrava a riqueza nas mãos de uma elite latifundiária, moldando as bases sociais e econômicas do Brasil por décadas. Conseqüentemente, essa estrutura colonial foi crucial para o desenvolvimento desigual do país (Furtado, 2001; Dean, 1999).

A industrialização no Brasil começou a ganhar impulso na segunda metade do século XIX, especialmente após a abolição da escravidão em 1888. Esse evento criou a necessidade de novas formas de trabalho, o que levou à imigração e ao crescimento do mercado interno, que foi impulsionado pela urbanização e pelo aumento populacional. Além disso, a construção de ferrovias e portos facilitou a integração nacional e o escoamento da produção. O investimento estrangeiro em setores como o têxtil e o metalúrgico também foi essencial para o crescimento da indústria brasileira (Fausto, 1994; Martins, 1997).

Durante o governo de Getúlio Vargas (1930-1945), o Brasil passou por uma fase importante de crescimento industrial, apesar dos efeitos da crise de 1929 e da Segunda Guerra Mundial. A industrialização, evidenciada pelo comportamento do PIB mostrado na Figura 1, permitiu que o país começasse a se afastar de sua base agrária e se orientasse para uma economia mais diversificada. A crescente importância da indústria em comparação à agropecuária entre 1930 e 1945, com uma inversão positiva nos rendimentos industriais ao longo desse período (Paulo Gala).

Criado em 1952, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) teve um papel essencial na expansão da industrialização brasileira. O banco oferece financiamentos de longo prazo e juros subsidiados para setores estratégicos como a indústria automobilística, siderúrgica e de construção civil. Além disso, foi vital no financiamento de infraestrutura, como hidrelétricas e portos, que facilitaram o escoamento da produção industrial (BNDES, 2023; Baer, 2007).

Durante o regime militar instaurado em 1964, o governo intensificou a industrialização, com foco em setores pesados, embora essa política tenha exacerbado desigualdades sociais e endividamento externo (Delfim Netto, 1984; Lamounier, 1989).

Após o fim do regime militar, o Brasil enfrentou a chamada "década perdida" de 1980, caracterizada por baixo crescimento, alta inflação e instabilidade social. O BNDES teve que redefinir seu papel, passando a financiar setores de alta tecnologia, como telecomunicações e informática, com o objetivo de modernizar a indústria e aumentar sua competitividade global. Na década de 1990, a abertura comercial impôs novos desafios à indústria nacional, que enfrentou forte concorrência de produtos importados. Novamente, o BNDES foi fundamental ao oferecer crédito para modernização tecnológica (Sachs, 1995; BNDES, 2023).

No século XXI, a indústria brasileira continua a lidar com desafios como alta carga tributária e infraestrutura insuficiente, os quais dificultam seu pleno desenvolvimento. Por isso, a inovação tecnológica, a diversificação produtiva e a integração ao mercado internacional são essenciais para garantir um crescimento sustentável. Nesse contexto, o BNDES segue sendo uma peça-chave nesse processo, ajudando a promover a modernização industrial e o avanço tecnológico, especialmente em setores estratégicos (BNDES, 2023; Haddad, 2023).

Paralelamente ao desenvolvimento industrial, as prensas excêntricas se tornaram cada vez mais sofisticadas e versáteis, permitindo a realização de uma ampla gama de operações, como corte, estampagem, repuxo e dobra de chapas metálicas. Essa diversificação de aplicações contribuiu para a expansão do uso da prensa excêntrica em diversos setores da indústria brasileira, como a automobilística, eletrodomésticos, eletrônicos e aeroespacial (INPE, 2023; ABINEE, 2023).

A prensa excêntrica oferece vantagens significativas em termos de produtividade e precisão, contudo, também apresenta um investimento inicial considerável. O preço de uma prensa excêntrica varia de acordo com sua capacidade, tecnologia embarcada e marca, podendo oscilar entre cinquenta e quinhentos mil reais, ou mais (ABIMAQ, 2023).

Em comparação com outras máquinas de conformação de metais, como prensas hidráulicas e máquinas de forjamento, a prensa excêntrica se destaca pela sua versatilidade e velocidade de operação. No entanto, as prensas hidráulicas oferecem maior força de prensagem, sendo mais adequadas para peças de grande porte ou com materiais mais rígidos. Já as máquinas de forjamento são utilizadas para a produção de peças em bruto, com formas complexas e alta densidade (ABIMAQ, 2023).

A prensa excêntrica pode produzir até múltiplas vezes mais do que a prensa hidráulica. Ela também garante alta precisão dimensional, com tolerâncias de até 0,01 mm, e pode realizar diversas operações de conformação de metais, como corte, estampagem, repuxo e dobra (ABIMAQ, 2023; Senai Nacional, 2020).

Apesar de sua importância indiscutível, a prensa excêntrica apresenta riscos à segurança dos trabalhadores, se as medidas de proteção adequadas não forem implementadas. Pontos de esmagamento, projeções de peças e ferramentas, ruídos excessivos e vibrações são apenas alguns dos perigos presentes nesse ambiente. Portanto, para garantir a segurança dos trabalhadores que operam prensas excêntricas, diversas medidas de adequação devem ser tomadas, tanto no âmbito da máquina quanto no ambiente de trabalho (ABIMAQ, 2023).

Pensando na segurança, a NBR NM 272:2002 estabelece diretrizes essenciais para a segurança de prensas excêntricas, visando a proteção dos operadores e a prevenção de acidentes. Essa norma aborda requisitos de projeto, construção e instalação, como a necessidade de dispositivos de proteção, sistemas de acionamento seguro e proteções fixas e móveis. A conformidade com a NBR NM 272:2002 é fundamental para garantir um ambiente de trabalho seguro e reduzir os riscos de acidentes graves, como amputações e esmagamentos, que são comuns em operações com prensas excêntricas (NBR NM 272:2002).

Além disso, a NBR 13761:1996 complementa a NBR NM 272:2002, especificando requisitos para dispositivos de proteção em prensas, como grades de proteção, cortinas de luz e dispositivos de retenção. Esses dispositivos são cruciais para evitar o acesso do operador à zona de perigo durante a operação da prensa. A norma também estabelece critérios para a seleção, instalação e manutenção desses dispositivos, garantindo sua eficácia na prevenção de acidentes (NBR 13761:1996).

Já a NBR 13760:1996 trata da segurança em prensas hidráulicas, que também são amplamente utilizadas na indústria. Embora existam diferenças no funcionamento entre prensas hidráulicas e excêntricas, os princípios de segurança são similares. A norma aborda requisitos de projeto, construção e instalação de prensas hidráulicas, incluindo sistemas de controle, dispositivos de segurança e procedimentos de operação. A observância da NBR 13760:1996 contribui para a redução de riscos de acidentes em prensas hidráulicas, como vazamentos de fluido hidráulico, rupturas de mangueiras e falhas no sistema de controle (NBR 13760:1996). Como demonstrado na figura 1, o exemplo de uma prensa excêntrica conforme a norma .



Figura 1 : Modelo da prensa excêntrica Pneumática ,com acionamento por pedal

A automação industrial, definida como um conjunto de tecnologias que visam automatizar tarefas complexas e repetitivas em ambientes industriais, integra sistemas eletrônicos, softwares e dispositivos mecânicos. Essa integração impulsiona a eficiência e a produtividade, otimizando a utilização de recursos e reduzindo custos operacionais (Groover, 2014; Nof, 2012).

A automação em prensas excêntricas aumenta significativamente a produtividade, eliminando a necessidade de intervenção humana em tarefas repetitivas e permitindo que os operadores se concentrem em atividades de maior valor agregado, como monitoramento e controle do processo. Além disso, melhora a precisão das operações, reduzindo o índice de erros e retrabalho, o que impulsiona a qualidade dos produtos finais. Dessa forma, a segurança também é aprimorada, afastando os trabalhadores de zonas de risco e promovendo um ambiente de trabalho mais seguro. Essa otimização do processo de produção, a diminuição do índice de erros e a menor necessidade de mão de obra contribuem para a redução significativa dos custos operacionais (Koren, 2010; Wang, 2015; Zhou, 2016; Bauernhansl, 2014).

As prensas excêntricas automatizadas são caracterizadas pela sinergia entre diversos componentes que garantem a eficiência e o controle preciso das operações. Entre esses componentes, destacam-se os controladores lógicos programáveis (CLPs), que armazenam os programas que controlam o movimento do motor principal, a força de prensagem e outras variáveis críticas do processo. Além disso, sensores e atuadores desempenham papéis fundamentais, monitorando a posição e a velocidade da prensa e ajustando os parâmetros operacionais em tempo real para garantir a qualidade do produto (Bolton, 2017; Petruzella, 2012; Parr, 2013).

A automação de prensas excêntricas também está fortemente associada à implementação da Indústria 4.0, que busca integrar tecnologias avançadas, como a Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e big data, no ambiente industrial. No contexto da Indústria 4.0, prensas excêntricas são equipadas com sensores inteligentes que monitoram continuamente o estado da máquina e enviam dados para sistemas de controle centralizados. Esses dados podem ser analisados para

prever falhas, otimizar a manutenção e melhorar o desempenho geral da produção (Schwab, 2017).

Porém, apesar das vantagens da automação, a sua implementação em larga escala no Brasil ainda enfrenta desafios consideráveis, como a falta de qualificação da mão de obra, a resistência à mudança e os altos custos iniciais de investimento. No entanto, esses obstáculos podem ser superados por meio de políticas públicas que incentivem a inovação e promovam a capacitação de trabalhadores para lidar com as novas tecnologias. O Brasil tem uma oportunidade única de aumentar sua competitividade global ao adotar práticas da Indústria 4.0, que promovem um futuro industrial mais eficiente, sustentável e integrado ao cenário global (Schwab, 2017; Martins, 2022).

Com a modernização tecnológica e a adoção de práticas sustentáveis, como a economia circular, o Brasil pode avançar em direção a uma indústria mais eficiente e ambientalmente responsável. Esse movimento, alinhado com as demandas globais por sustentabilidade, oferece oportunidades para o desenvolvimento de novos modelos de negócios e produtos que atendam às expectativas de um mercado cada vez mais exigente e consciente dos impactos ambientais (Martins, 2022).

Na figura 2 intitulada "Arquitetura Estratégica de Dados" ilustra a necessidade atual do Brasil em desenvolver uma estrutura de dados robusta e integrada, essencial para a modernização da indústria no contexto da Indústria 4.0 e da automação industrial. Essa arquitetura reflete a necessidade de unir diversas fontes de dados, tanto internas quanto externas, e conectá-las a sistemas de análise avançada e cloud computing, criando uma base sólida para a tomada de decisões informada e ágil.



Figura 2 : Arquitetura Estratégica de Dados (no trabalho de Eduardo Magrani, pela FGV)

No cenário brasileiro, onde a adoção da Indústria 4.0 ainda enfrenta desafios, como a resistência à inovação e a falta de mão de obra qualificada, essa estrutura de dados torna-se crucial para superar tais obstáculos. A integração de sistemas de gestão, plataformas de análise e relatórios operacionais não só eleva a competitividade das empresas, mas também permite uma adaptação mais rápida às demandas de um mercado global dinâmico e exigente. Assim, com um foco em automação e análise de dados, o Brasil pode explorar novas oportunidades de crescimento sustentável e aumentar sua presença no cenário industrial global (Martins, 2022; Schwab, 2017).

Objetivo

Objetivo Principal:

Automatizar o sistema de controle e operação de uma prensa excêntrica.

Objetivos Específicos:

- **Compreender o Funcionamento da Prensa Excêntrica:**
 - Descrever o mecanismo de funcionamento da prensa excêntrica, incluindo seus principais componentes e suas funções.
 - Identificar os requisitos de segurança para a operação da prensa.
- **Dominar o Controle de Motores de Passo:**
 - Pesquisar diferentes tipos de motores de passo e suas características, selecionando o modelo mais adequado para a aplicação na prensa.
 - Estudar o princípio de funcionamento dos motores de passo, incluindo os conceitos de passo, ângulo de passo, torque e velocidade.
 - Analisar diferentes métodos de acionamento de motores de passo, como o uso de drivers dedicados e microcontroladores.
 - Implementar o controle de velocidade e posição dos motores de passo através de sinais PWM gerados pelo microcontrolador.
- **Projetar e Implementar o Sistema de Automação:**
 - Definir a arquitetura do sistema de automação, incluindo os componentes de hardware e software.
 - Selecionar os sensores apropriados para monitorar a posição, presença e outros parâmetros relevantes da prensa.
 - Desenvolver o circuito eletrônico para conectar os sensores, motores de passo, relé e microcontrolador.
 - Elaborar o firmware do microcontrolador para controlar o ciclo de operação da prensa, incluindo a leitura dos sensores, o acionamento dos motores e a gestão da segurança.
 - Construir um protótipo funcional do sistema de automação, integrando os componentes de hardware e software.

Metodologia

A pergunta central que norteia este trabalho é: Como desenvolver um sistema de alimentação automática, controlado por microprocessador, capaz de acionar motores e atuadores de forma sequencial e precisa, garantindo a segurança do operador através de sensores de presença e botões de emergência?

Este projeto visa construir um sistema automatizado para operações de alimentação de materiais em processos industriais, abordando os desafios de controle sequencial de motores e atuadores, com foco na eficiência e segurança. A inclusão de um sistema de segurança, com sensores de presença e um botão de emergência, é essencial para evitar o funcionamento do equipamento na presença de operadores na zona de risco, promovendo a segurança e a confiabilidade do sistema.

A relevância deste projeto reside na sua contribuição para a segurança no ambiente industrial, pois a automação de sistemas de alimentação, especialmente com controle microprocessado, minimiza a exposição do operador a zonas de risco e oferece um sistema mais preciso e ágil na execução das operações. Assim, além de reduzir os riscos de acidentes, o sistema pode otimizar a produtividade e reduzir custos operacionais.

Este trabalho baseia-se em conhecimentos de engenharia elétrica (controle e acionamento de motores e sensores de segurança), engenharia mecânica (cinemática e dinâmica dos mecanismos) e segurança do trabalho (normas e práticas de segurança industrial). A metodologia seguirá etapas sequenciais, combinando abordagens teóricas e práticas, para garantir a robustez e aplicabilidade do sistema em situações reais de operação industrial.

Estrutura Metodológica

O projeto está organizado em etapas distribuídas em duas fases principais: o Projeto Conceitual, a Construção e Validação do Protótipo. Cada fase é descrita a seguir, com foco no desenvolvimento de um sistema que integre segurança e eficiência na operação de alimentação automática.

Fase 1: Projeto Conceitual (Executada no Trabalho de conclusão do mesmo autor 1)

Esta fase inicial será dedicada à revisão da literatura e ao desenvolvimento do projeto conceitual, onde são definidos os requisitos funcionais, de segurança e de desempenho do sistema, além da seleção dos componentes principais.

Revisão da Literatura e Normas de Segurança: Pesquisa e análise de normas e melhores práticas de segurança industrial, especialmente NR-12, que orientarão a integração de sensores de presença e botões de emergência para garantir um ambiente de trabalho seguro.

A primeira etapa envolve a definição dos requisitos do sistema, com especificações que assegurem a capacidade de controle sequencial dos motores e do atuador, bem como o atendimento aos requisitos mínimos de resposta do sistema de segurança. Esses requisitos incluem especificações de segurança, como a implementação de sensores de presença e um botão de emergência para proteger o operador, além de especificações de controle, que abrangem precisão, sequenciamento e uma interface de operação intuitiva.

Para o projeto conceitual, será desenvolvido um diagrama de blocos funcional que representa a interação entre o microprocessador, os motores, os sensores e os atuadores, servindo como a estrutura-base para a construção do protótipo. Em seguida, realiza-se a seleção de componentes, onde são pesquisados e selecionados motores, um microprocessador adequado (como o STM32), sensores de presença e um botão de emergência, além de outros componentes essenciais que garantirão o atendimento aos requisitos de controle e segurança definidos para o sistema

Fase 2: Construção e Validação do Protótipo (2 meses)

Após o planejamento conceitual, inicia-se a construção e os testes do protótipo, incluindo a instalação do sistema de segurança em um ambiente controlado para validação.

Primeiro, procede-se com o desenvolvimento do circuito eletrônico e do sistema de segurança, desenhando o circuito que integra os sensores de presença

e o botão de emergência ao microprocessador. Este último será responsável por gerenciar ações de parada e reinício em caso de detecção de presença na zona de risco. Em seguida, realiza-se a montagem do protótipo em uma protoboard, o que permite testes preliminares para validar a funcionalidade tanto do controle quanto da segurança.

Na fase de desenvolvimento e programação do software de controle, o sistema é configurado para inicializar corretamente, incluindo a definição dos pinos de entrada e saída (I/O), leitura dos sensores de presença e o estado inicial do botão de emergência. Implementa-se então a lógica de controle sequencial, que programa o acionamento dos motores e do atuador em sequência, assegurando que o ciclo de operação ocorra apenas quando a área estiver livre de operadores. A rotina de segurança é monitorada constantemente, programando o sistema para interromper imediatamente o funcionamento caso seja detectado qualquer risco.

Por fim, realiza-se o teste do protótipo em ambiente industrial controlado, instalando o sistema em um ambiente simulado de operação para testá-lo em condições próximas às reais. Nesta etapa, verifica-se o acionamento correto dos motores e do atuador, validando o sequenciamento e o tempo de resposta dos sensores de presença e do botão de emergência. Além disso, monitora-se o desempenho do sistema em termos de precisão, confiabilidade e segurança, realizando ajustes conforme necessário para otimizar seu funcionamento.

A coleta de dados será conduzida por meio de sensores e um código de aquisição dedicado. Os sensores de presença e os sensores integrados aos motores e atuadores fornecerão dados em tempo real sobre o estado do sistema, monitorando tanto a detecção de presença na área de risco quanto o funcionamento dos componentes durante a operação. Um código específico de aquisição de dados será desenvolvido para registrar as informações dos sensores e do botão de emergência ao longo do funcionamento do sistema, permitindo uma análise detalhada e posterior do desempenho em diferentes condições.

Os dados coletados serão analisados sob perspectivas quantitativas e qualitativas. A análise quantitativa incluirá métricas de precisão temporal, consumo de energia e acionamento dos sensores, enquanto a qualitativa considerará o

feedback dos operadores sobre usabilidade e segurança. Essas informações serão fundamentais para identificar eventuais melhorias no controle e na segurança do sistema, permitindo ajustes que potencializam seu desempenho e segurança.

Quanto aos recursos necessários para o desenvolvimento do projeto, eles incluem recursos financeiros para a aquisição de componentes, como microprocessador, motores, sensores de presença e botão de emergência, além de outros componentes eletrônicos. Materiais como sensores, atuadores, protoboard, fontes de alimentação e cabos serão necessários para a montagem e testes do protótipo. A equipe do projeto também contará com colaboradores especializados em controle, automação e segurança, que fornecerão o conhecimento técnico essencial para a implementação e otimização do sistema.

Desenvolvimento e Materiais

O sistema começa com uma entrada de alimentação bifásica (127/220 V), protegida por um disjuntor que limita a corrente e protege contra sobrecargas e curtos. Após o disjuntor, uma fonte de alimentação converte a energia AC para 24 V DC e 10 A, fornecendo a alimentação necessária para o microcontrolador, motores de passo e relé.

A fonte de 24V DC é o ponto central de distribuição de energia para o sistema. Ela alimenta diretamente o microcontrolador MSP EXP 430G2, que gerencia o acionamento dos motores de passo e do relé de saída. O microcontrolador controla as saídas que ativam o driver dos motores e o relé, garantindo o funcionamento correto.

Os motores de passo (modelo JK67HS112-3004-03) são controlados pelo microcontrolador por meio de uma ponte H, que permite o controle da direção e da velocidade de rotação dos motores. A ponte H atua como intermediária entre o microcontrolador e os motores, recebendo energia da fonte de 24 V para operar os motores com precisão.

O relé de saída de 24 V, também controlado pelo microcontrolador, aciona a bobina JF 0530B (24 VDC, 300 mA), que possui um curso de 10 mm. Quando o relé é ativado, a bobina é energizada, realizando a operação mecânica necessária no sistema.

Para garantir a segurança, o sistema conta com um botão de emergência, que interrompe a alimentação dos motores e do relé ao ser acionado, cortando a energia em situações de emergência. Além disso, sensores de presença são conectados ao microcontrolador, configurados para interromper o ciclo de operação se detectarem presença não autorizada, garantindo a proteção dos operadores.

Para ilustrar o fluxograma (referente a figura 3) ,que descreve o funcionamento de um protótipo de alimentador automático para uma prensa excêntrica, com foco em segurança e controle automatizado. O processo começa com a verificação da entrada de energia elétrica, garantindo que o sistema esteja

recebendo energia dentro do padrão adequado, que é bifásica (127/220V). Essa verificação é essencial para evitar danos ao equipamento ou falhas de funcionamento. Se a energia não estiver dentro do padrão especificado, o sistema é imediatamente desligado, evitando riscos operacionais.

Caso a energia esteja adequada, o microcontrolador MSP430 é alimentado, permitindo que o código de controle seja carregado no dispositivo. Esse código é o responsável por comandar todas as etapas do protótipo, desde as verificações de segurança até o acionamento dos motores e atuadores.

Depois que o código é carregado, o sistema realiza uma checagem de segurança. Nesta etapa, são verificados sensores e dispositivos de proteção, garantindo que todos os mecanismos de segurança estejam ativos e operando corretamente. Essa verificação é fundamental para evitar acidentes ou danos durante o funcionamento da máquina. Se alguma irregularidade for identificada, o sistema volta para as etapas anteriores até que todos os problemas sejam corrigidos.

Com as condições de segurança atendidas, o sistema avalia se está pronto e seguro para operar. Caso esteja, o próximo passo é emitir o comando para iniciar o ciclo automático. Esse comando ativa os motores e atuadores do protótipo, que são responsáveis por alimentar a prensa excêntrica com material de forma automatizada, garantindo precisão e eficiência no processo de trabalho.

Durante o funcionamento, o sistema monitora constantemente o estado dos motores e atuadores. Caso ocorra alguma falha ou problema no acionamento desses dispositivos, o sistema finaliza o processo automaticamente para evitar danos à máquina ou riscos aos operadores. Após a conclusão de um ciclo completo ou em caso de interrupção por falha, o sistema entra em modo de finalização, aguardando novos comandos ou ajustes.

O design desse protótipo demonstra uma abordagem estruturada e segura para automação industrial, utilizando o microcontrolador MSP430 para gerenciar as etapas de verificação, segurança e controle. Esse fluxo garante que a prensa excêntrica só opere em condições ideais, priorizando a segurança dos operadores e a integridade do equipamento.

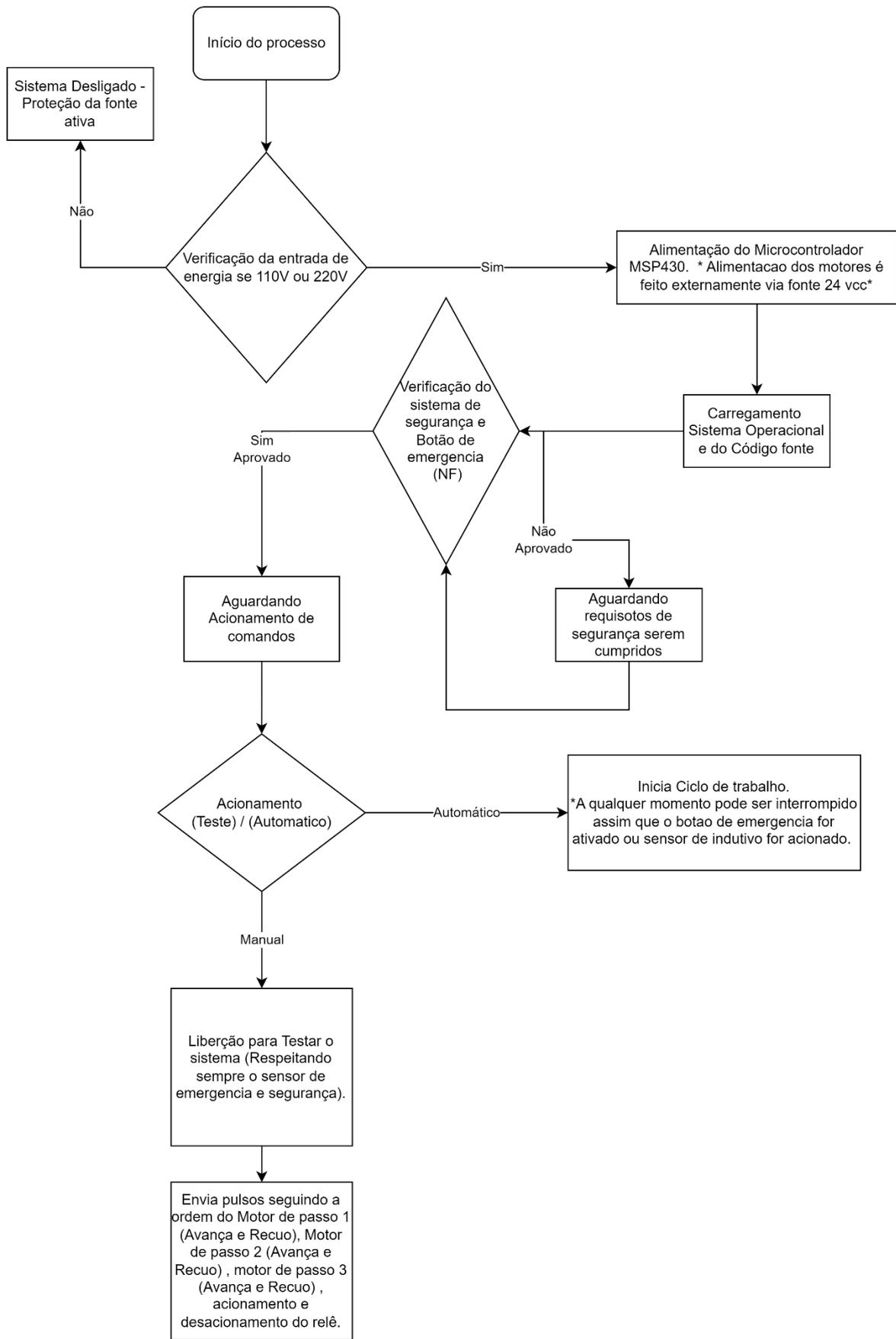


Figura 3 - Diagrama de funcionamento da máquina.

O sistema de alimentação para uma prensa excêntrica será projetado para automatizar o processo de posicionamento e estampagem do material, garantindo precisão, segurança e eficiência. O núcleo desse sistema será um microcontrolador, como um STM32, ESP32 ou MSP430, que terá a função de coordenar e sincronizar as ações de três motores de passo e um atuador. Esse microcontrolador será programado para executar todas as etapas necessárias de forma automática, eliminando a necessidade de intervenção manual durante o funcionamento, a menos que seja selecionado o modo teste para verificação se todos os componentes da máquina estão com o funcionamento coerentes.

O primeiro componente fundamental do sistema é o microcontrolador que é a chave central do sistema. Com ela, podemos controlar os acionamentos, os acionamentos e o sequenciamento dos componentes ativos. O primeiro deles é o Motor de Passo 1, cuja função é deslocar o material até a base de estampar. Este motor precisa ser altamente preciso e robusto, pois será responsável por garantir que o material esteja posicionado corretamente para cada ciclo de estampagem. Por exemplo, o motor deve ser capaz de avançar o material por uma distância específica (em milímetros) com exatidão, respeitando o sincronismo com a prensa.

O segundo motor de passo, o Motor de Passo 2, será utilizado para acionar um mecanismo de pinça. Este mecanismo terá a função de segurar o material no local exato durante o deslocamento e a estampagem, evitando que ele escorregue ou fique desalinhado. A pinça deverá aplicar uma força suficiente para manter o material fixo, mas sem causar danos a ele. Já o Motor de Passo 3 terá o papel de estabilizar a base do material, que terá aproximadamente 1 metro de comprimento. Este motor será responsável por evitar que o material balance ou oscile durante o movimento, garantindo que o sistema opere de forma estável e com precisão máxima.

Além dos motores, o sistema contará com um atuador, que será responsável por acionar a bobina que controla o movimento da prensa excêntrica. A bobina será liberada pelo atuador para que a prensa realize o movimento de estampagem e, em seguida, será travada novamente para aguardar o próximo ciclo. Este atuador precisa ser rápido e confiável, garantindo que a prensa opere de forma sincronizada

com os motores de passo. A atuação precisa e repetitiva do atuador será essencial para o bom funcionamento do sistema.

Para alimentar todos os componentes, o sistema contará com uma fonte de alimentação projetada para fornecer energia suficiente ao microcontrolador, aos motores de passo e ao atuador. A fonte deve ser dimensionada para garantir estabilidade e evitar interferências entre os componentes. Por exemplo, o microcontrolador pode ser alimentado por uma fonte de 5V/3A, enquanto os motores e o atuador podem usar uma fonte de 24V/10A. A separação entre as alimentações do microcontrolador e dos motores é importante para evitar ruídos elétricos que poderiam comprometer o desempenho do sistema.

A segurança e a precisão serão reforçadas com a instalação de diversos sensores no sistema. Sensores de limite (fim de curso) serão usados para detectar o posicionamento correto do material, garantindo que ele esteja alinhado antes da estampagem. Sensores de presença verificarão se o material está na posição certa antes de liberar o movimento da prensa, evitando acionamentos desnecessários ou perigosos. Esses sensores serão conectados ao microcontrolador, que tomará decisões com base nos sinais recebidos, aumentando a confiabilidade do sistema.

O controle dos motores de passo será realizado por drivers, como o TB6600 ou o DRV8825, que serão responsáveis por converter os sinais enviados pelo microcontrolador em movimentos precisos dos motores. Esses drivers permitem o ajuste de corrente, protegendo os motores contra sobrecargas e prolongando sua vida útil. Além disso, o software do microcontrolador será desenvolvido para controlar todas as etapas do sistema, desde o deslocamento do material até o acionamento da prensa, de forma sincronizada e automatizada. Esse software incluirá algoritmos para gerenciar os movimentos dos motores, monitorar os sensores e ativar o atuador no momento correto.

A estrutura mecânica do sistema será projetada para suportar todo o processo. A base do material permitirá o deslocamento suave e preciso realizado pelo Motor de Passo 1. O mecanismo de pinça, acionado pelo Motor de Passo 2, será projetado para segurar o material de forma firme, enquanto o Motor de Passo 3

estabilizará a base para evitar qualquer vibração. O atuador será integrado ao mecanismo de controle da prensa, garantindo que o movimento de estampagem seja ativado apenas quando todas as condições de segurança forem atendidas.

Por fim, uma interface de usuário poderá ser adicionada ao sistema, permitindo que o operador controle o equipamento de forma simples e monitorando o status do processo. Essa interface pode incluir botões para iniciar e parar o sistema, bem como um display para exibir informações como erros ou o status atual. Com esse design, o sistema de alimentação será capaz de operar de forma autônoma, segura e precisa, atendendo às demandas industriais de alimentação de prensas excêntricas.

O sistema de alimentação da prensa excêntrica foi projetado com foco na eficiência e segurança, garantindo conformidade com as normas regulamentadoras vigentes. Para isso, a interface de controle incorpora botões e sensores estrategicamente posicionados, desempenhando funções essenciais para um funcionamento seguro e confiável. Um dos principais componentes de segurança é o botão de emergência, do tipo normalmente fechado (NF), que, ao ser acionado, interrompe imediatamente toda a operação. Posicionado de forma acessível ao operador, ele desativa os motores e o atuador, deixando o sistema completamente inoperante até que a situação seja regularizada. Essa funcionalidade assegura uma resposta rápida em casos de emergência, protegendo o operador e o equipamento.

Além do botão de emergência, o sistema conta com um botão de início de ciclo, do tipo normalmente aberto (NO), que permite iniciar o processo automatizado. Esse botão possui uma funcionalidade adicional de segurança: se pressionado duas vezes em menos de dois segundos, o sistema reconhece o comando como uma solicitação de parada. Essa função é particularmente útil em situações onde o operador precisa interromper o ciclo no momento seguro seguinte, sem a necessidade de paradas abruptas. Para situações que demandam a interrupção imediata do processo, há também um botão de parada, também do tipo normalmente aberto, que desliga o sistema instantaneamente. Esse botão é essencial para garantir uma reação rápida a qualquer irregularidade durante o funcionamento.

O monitoramento do material é realizado por um sensor de indução PNP com alcance de 2 mm, projetado para identificar a presença de material metálico. Caso o sensor não detecte material na área de trabalho, o sistema automaticamente pausa o ciclo, evitando o acionamento desnecessário da prensa. Isso protege o equipamento contra desgastes e falhas, além de aumentar a eficiência do processo ao evitar ciclos ociosos. Outro elemento de segurança integrado ao sistema é o fim de curso, que isola o sistema em condições específicas, como durante manutenções ou em casos de falhas graves. Esse dispositivo impede o funcionamento em situações inseguras, atendendo às exigências normativas e garantindo a proteção do operador.

Todos os botões e sensores operam com uma tensão de acionamento de 5V+, mantendo os níveis abaixo de 60V, em conformidade com a NR-12 - Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos. Essa limitação de tensão reduz significativamente os riscos de choques elétricos e assegura a segurança dos operadores durante a manipulação dos controles. A aplicação da norma garante que o sistema esteja alinhado aos requisitos mínimos de proteção do trabalho em máquinas e equipamentos, promovendo um ambiente de trabalho mais seguro.

Em síntese, o sistema de alimentação da prensa excêntrica combina eficiência e segurança ao incorporar dispositivos de controle inteligentes e sensores confiáveis, projetados para operar dentro das normas regulamentadoras. Essa abordagem garante a proteção do operador, a integridade do equipamento e a conformidade com os padrões de automação industrial moderna, tornando o sistema uma solução robusta e segura para aplicações industriais.

O sistema será alimentado pela linha de alimentação principal, com tensão de 127/220 V AC, passando por um disjuntor bipolar de 10 A para proteção contra curtos-circuitos e sobrecargas. A energia será convertida por uma fonte de alimentação DC para fornecer 24 V aos motores, relé e microcontrolador. O microcontrolador MSP430G2553 será responsável pelo controle central do sistema, gerenciando os motores de passo, relé e dispositivos de segurança.

Os motores de passo serão controlados por drivers de ponte H (L298N), um para cada motor. O Motor 1 (NEMA 23) movimentará o material até a posição de estampo, enquanto os Motores 2 e 3 (NEMA 17) acionarão a pinça de fixação do

material e estabilizarão a base, respectivamente. O relé de saída JF 0530B será utilizado para ativar a bobina que libera o movimento da prensa excêntrica.

Os botões de controle desempenham papéis críticos na operação do sistema. O botão de emergência (NF) interrompe toda a energia em situações de emergência, enquanto o botão de início de ciclo (NO) inicia o processo automatizado, com a função adicional de identificar um comando de parada com dois cliques em menos de dois segundos. Já o botão de parada (NO) permite interrupções instantâneas do sistema.

O sensor de indução PNP detectará a presença de material metálico na área de trabalho, garantindo que o sistema não opere sem material, enquanto o fim de curso de segurança isola o sistema em condições inseguras, como durante a manutenção ou em caso de falhas. Cabos e conectores adequados serão usados para interligar todos os componentes, garantindo robustez e segurança na instalação elétrica.

Dimensionamento dos Componentes:

Transistor: Escolha um transistor com corrente de coletor (I_c) maior que a corrente nominal da bobina do relé.(Malvino , 2016).

Resistor Base: Calcule o valor do resistor base para garantir que a corrente de base (I_b) seja suficiente para saturar o transistor.(Malvino , 2016).

Diodo de Proteção: Utilize um diodo com tensão reversa (VRRM) maior que a tensão de alimentação do relé.(Malvino , 2016).

Para um relé de 24Vcc com corrente de bobina de 100mA, você poderia usar um transistor BC548 ($I_c = 100\text{mA}$) com um resistor base de $1\text{k}\Omega$ e um diodo 1N4007 (VRRM = 1000V).

Tendo todo o dimensionamento , para proteger o transistor da alta tensão induzida na bobina quando o relé é desativado, um diodo de proteção, como o 1N4007, é conectado em paralelo com a bobina, com a polaridade invertida. Esse

diodo, também conhecido como diodo flyback, desvia a corrente induzida, evitando danos ao transistor.

Para explicar melhor ,o diodo do conversor flyback, também conhecido como diodo de roda livre ou diodo snubber, é um componente essencial em circuitos que envolvem cargas indutivas, como a bobina de um relé. S

Sua principal função é proteger os componentes eletrônicos, como transistores, dos picos de alta tensão que ocorrem quando a corrente na bobina é interrompida. Esses picos de tensão, conhecidos como força contraeletromotriz (FCEM), podem danificar ou destruir componentes sensíveis. O diodo flyback, posicionado em paralelo com a bobina, mas com polaridade invertida, oferece um caminho seguro para a corrente induzida circular, dissipando a energia armazenada na bobina e protegendo o circuito.(Boylestad,2015)

Capacitores Eletrolíticos:

Os Capacitores Eletrolíticos de 100uF (alimentação do motor): Este capacitor serve para filtrar ruídos e fornecer uma reserva de energia para o motor de passo, especialmente durante transições rápidas de corrente. Um valor de 100uF é comum para motores de passo de médio porte.

Os Capacitores Eletrolíticos de 100nF (desacoplamento do driver): Este capacitor é colocado próximo aos pinos de alimentação do driver A4988 para filtrar ruídos de alta frequência e garantir um fornecimento de energia estável para o chip. Um valor de 100nF é um valor padrão para desacoplamento de circuitos integrados.

Capacitores Cerâmicos:

Os capacitores cerâmicos de 100 nF (desacoplamento): Três capacitores cerâmicos de 100 nF são utilizados para desacoplamento adicional dos pinos de alimentação e dos pinos lógicos do driver A4988 e do microcontrolador. Isso ajuda a reduzir o ruído e garantir o funcionamento estável dos componentes.

Microchip A4988 :

O A4988 é um chip de controle para motores de passo com micro-stepping e um tradutor integrado para fácil operação. Ele é projetado para operar motores de passo bipolares nos modos de passo completo, meio passo, 1/4 de passo, 1/8 de passo e 1/16 de passo, com capacidade de saída de até 35V e $\pm 2A$. O A4988 inclui um regulador de corrente com tempo de desligamento fixo que pode operar nos modos de decaimento lento ou misto. No modo lento, a corrente diminui gradualmente quando o tempo de desligamento é ativado. Já no modo misto, a corrente inicialmente decai rapidamente e depois mais lentamente durante o tempo de desligamento. A escolha entre os modos de decaimento afeta o desempenho do motor. O decaimento lento geralmente resulta em um motor mais silencioso, mas com menor precisão e maior dissipação de energia. O decaimento misto oferece um equilíbrio entre ruído, precisão e dissipação de energia, sendo uma boa opção para a aplicação em específico. Durante a operação de passo, o controle de chopper no A4988 seleciona automaticamente o modo de decaimento de corrente, lento ou misto. (A4988 Datasheet ,2009-2010)

O controle de chopper, presente no driver A4988, é uma técnica utilizada para regular a corrente que flui pelas bobinas do motor de passo. Ele funciona como um interruptor rápido, ligando e desligando a corrente em alta frequência. Durante a operação de passo, o driver seleciona automaticamente o modo de decaimento mais adequado, dependendo da velocidade e da carga do motor. Essa seleção automática otimiza o desempenho do motor, minimizando o ruído e a vibração, evitando o superaquecimento do motor e garantindo a precisão do movimento. (Austin Hughes e Bill Drury, 2013)

Segundo o diagrama da Figura 4, o tradutor é a chave para a fácil implementação do A4988. Basta inserir um pulso na entrada STEP para que o motor avance um micro passo. Não há tabelas de sequência de fase, linhas de

controle de alta frequência ou interfaces complexas para programar. (A4988 Datasheet ,2009-2010)

Circuitos internos de controle de retificação síncrona são fornecidos para melhorar a dissipação de energia durante a operação PWM. A proteção interna do circuito inclui: desligamento térmico com histerese, bloqueio por subtensão (UVLO) e proteção contra corrente de cruzamento. Não é necessária uma sequência especial de energização.(A4988 Datasheet ,2009-2010)

O A4988 é fornecido em um pacote QFN,de montagem em superfície (ES), 5 mm × 5 mm, com altura nominal total de 0,90 mm e uma almofada exposta para melhor dissipação térmica. Essa Sigla significa refere-se a "Quad Flat No-leads", ou seja, é um tipo de encapsulamento quadrado e plano, sem pinos salientes. Ele é projetado para ser soldado diretamente na superfície da placa de circuito impresso, o que economiza espaço e facilita a produção em massa. Ele é livre de chumbo (sufixo -T), com terminais 100% revestidos de estanho fosco.(A4988 Datasheet ,2009-2010)

A4988

DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection

Functional Block Diagram

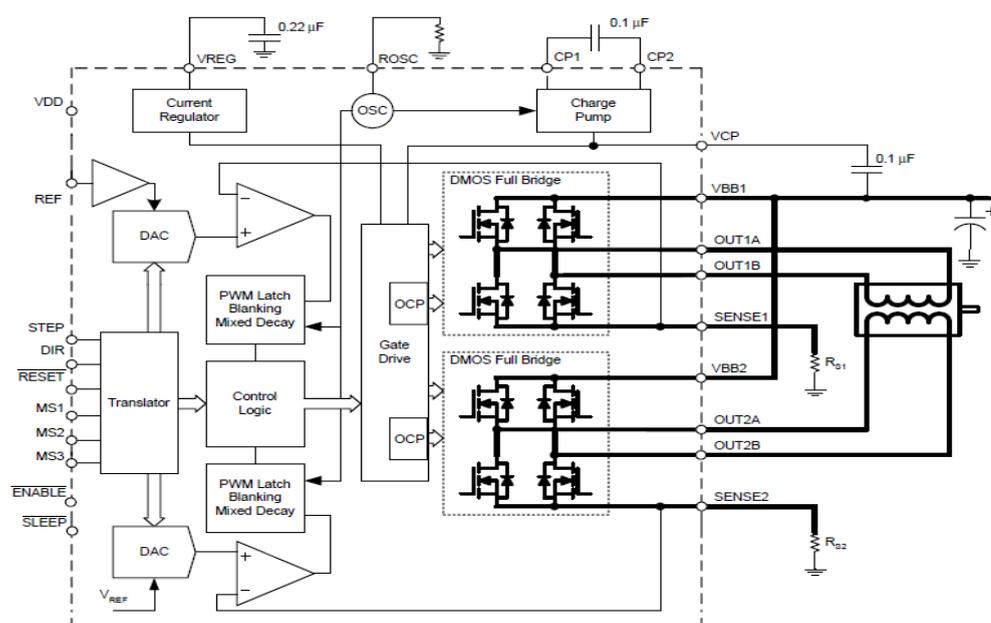


Figura 4 - Diagrama do circuito elétrico(datasheet do chip A4988) .

Montagem e Conexões:

- 1.Montar os componentes em uma protoboard ;
- 2.Conectar a fonte de alimentação de 24Vcc aos pinos VMOT e GND do driver A4988;
- 3.Conectar os pinos de bobina do motor (1A, 1B, 2A, 2B) aos respectivos pinos do driver;
- 4.Conectar os pinos de controle (STEP, DIR, ENABLE) do driver aos pinos GPIO do microcontrolador STM32;
- 5.Conectar os resistores de ajuste de corrente aos pinos 1A, 1B, 2A e 2B do driver;
- 6.Conectar os capacitores de acordo com o esquema da figura 5:

pulso no pino STEP, respectivamente. Essas configurações aumentam ainda mais a resolução, tornando o movimento ainda mais suave e preciso.

Para aumentar a resolução de micropasso geralmente diminui o torque do motor. Já para aumentar a resolução de micropasso pode limitar a velocidade máxima do motor. E conforme o micropasso for alterado, ajuda a reduzir a vibração do motor, especialmente em baixas velocidades.

MS1	MS2	MS3	Resolução
Baixo GND	Baixo GND	Baixo GND	Passo completo (1)
Alto 5 VDC	Baixo GND	Baixo GND	Meio passo (1/2)
Baixo GND	Alto 5 VDC	Baixo GND	1/4 de passo (1/4)
Alto 5 VDC	Alto 5 VDC	Baixo GND	1/8 de passo (1/8)
Alto 5 VDC	Alto 5 VDC	Alto 5 VDC	1/16 de passo (1/16)

Figura 6- Tabela de funcionamento da saída MS1,MS2e MS3 do A4988.(Diagrama do A4988)

Funcionamento:

A Figura 7, apresenta um diagrama de blocos que ilustra o funcionamento de um sistema automatizado para prensas excêntricas. O diagrama detalha o fluxo de operações, desde a verificação inicial da prensa até o acionamento do motor de passo para alimentação automática do material, passando por etapas de segurança e verificação do posicionamento.

Diagrama de blocos do Funcionamento

Esse diagrama tem como intuito de ilustrar o funcionamento do sistema

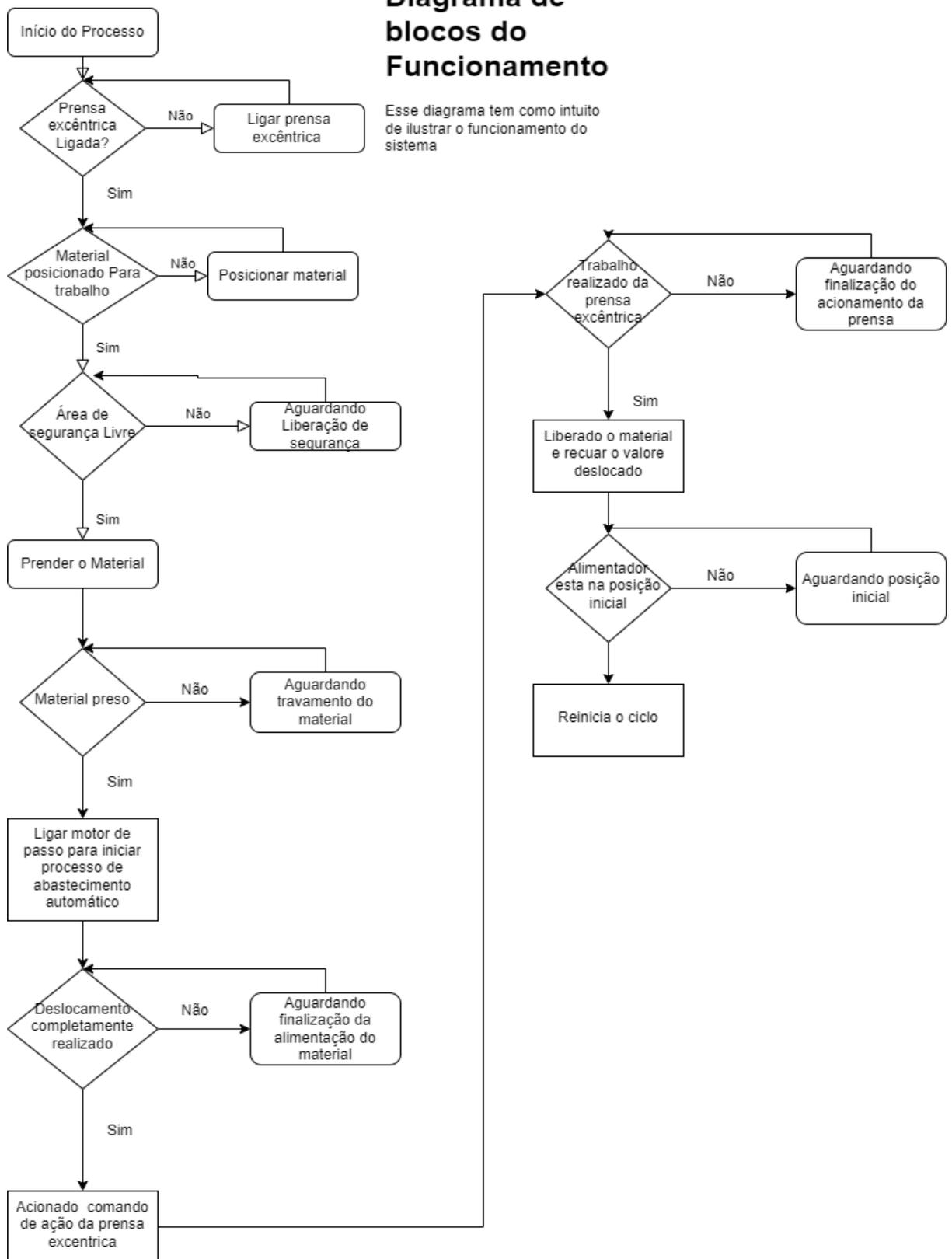


Figura 7- Diagrama de funcionamento do processo de alimentação automática.(Autoria própria)

Para estabelecer a comunicação entre o microcontrolador MSP430 e o driver de motor de passo A4988, o código em linguagem C apresentado no Anexo I realiza as seguintes ações:

Definição dos Pinos GPIO:STEP_Pin, STEP_GPIO_Port: Pino e porta GPIO responsáveis por gerar o pulso de clock (STEP) para o A4988, controlando o avanço do motor de passo.

DIR_Pin, DIR_GPIO_Port: Pino e porta GPIO que definem a direção de rotação do motor (horário ou anti-horário).

ENABLE_Pin, ENABLE_GPIO_Port: Pino e porta GPIO que habilitam ou desabilitam o funcionamento do driver A4988.

Função step():Esta função é responsável por enviar um pulso STEP para o driver A4988.Ela coloca o pino STEP em nível alto (GPIO_PIN_SET), aguarda um curto período (1 milissegundo neste exemplo, ajustável conforme necessário) e, em seguida, coloca o pino STEP em nível baixo (GPIO_PIN_RESET).Cada pulso STEP faz o motor avançar um passo.

Função main():Configuração: Inicialmente, realiza a configuração do HAL (Hardware Abstraction Layer) e do clock do microcontrolador.

Habilitação do A4988: Coloca o pino ENABLE em nível baixo (GPIO_PIN_RESET) para habilitar o driver A4988.

Definição da Direção: Define a direção inicial de rotação do motor como anti-horário (GPIO_PIN_SET no pino DIR).

Loop Infinito:

Envio de Pulsos STEP: Um loop for envia 200 pulsos STEP para o driver, fazendo o motor girar uma volta completa (o número de passos por volta depende do motor e da configuração do micro-stepping).

Atraso: Um atraso de 10 milissegundos é inserido entre cada pulso STEP para controlar a velocidade de rotação do motor.

Inversão da Direção: A função HAL_GPIO_TogglePin inverte o estado lógico do pino DIR, mudando a direção de rotação do motor.

Configuração do Relé/Saída: Ao utilizar um relé, é fundamental verificar se o pino GPIO selecionado possui capacidade de fornecer a corrente necessária para acioná-lo. Para o valor setado no programa de "delay_cycles(1000000)", sendo o clock definido para o teste de 1 MHz (1.000.000 ciclos por segundo), então cada ciclo leva 1 segundo (1 s).

$$\text{Tempo (ms)} = 1.000.000 \text{ ciclos} / 1 \text{ MHz} = 1 \text{ s}$$

Pausa: Um atraso de 1 segundo é inserido antes de iniciar a rotação na direção oposta.

Sequência de Operação:

Motor 1: Gira no sentido horário (correspondente a MOTOR1 DE PASSO).

Delay: Aguarda 2 segundos após o movimento do Motor 1.

Motor 2: Gira no sentido horário (correspondente a MOTOR2 DE PASSO).

Delay: Aguarda 2 segundos após o movimento do Motor 2.

Motor 3: Gira no sentido horário (correspondente a MOTOR3 DE PASSO).

Delay: Aguarda 2 segundos após o movimento do Motor 3.

Relé 1: Aciona o relé em P1OUT.

Delay: Relé permanece acionado por 0,5 segundos.

Motor 1: Gira no sentido anti-horário (correspondente a MOTOR1 DE PASSO).

Motor 3: Gira no sentido anti-horário (correspondente a MOTOR3 DE PASSO).

Relé 1: Desliga o relé em P1OUT.

Delay: Aguarda 1 segundo após desligar o relé.

Motor 2: Gira no sentido anti-horário (correspondente a MOTOR2 DE PASSO).

Delay: Aguarda 1 segundo após o movimento do Motor 2.

Após isso, entra em loop infinito para validar o funcionamento do acionamento do motor de passo e do acionamento do relé e retorno dos motores para as posições iniciais .

Cálculos e dimensionamento

Lista de Componentes:

- **Drivers A4988:** 3x chips controladores de motor de passo bipolar (um para cada motor).
- **Protoboard:** Para prototipagem e demonstração da funcionalidade do circuito.
- **Motores de Passo Bipolares:** 3x motores compatíveis com a tensão de 24Vcc e a corrente máxima do driver A4988 (até 2A por bobina). **Escolha motores com características similares para garantir um funcionamento uniforme.**
- **STM32 (ou outro microcontrolador):** Para gerar os sinais de controle (STEP, DIR, ENABLE) para os três motores e o relé.
- **Fonte de Alimentação 24Vcc:** Para alimentar os motores de passo e o relé. **Certifique-se de que a fonte tenha capacidade de corrente suficiente para alimentar todos os componentes simultaneamente.**
- **Fonte de Alimentação 5V:** Para alimentar o microcontrolador, se necessário.
- **Capacitores Eletrolíticos:**
 - 1x 100uF (para a alimentação do motor) - **Recomenda-se usar um capacitor para cada motor, totalizando 3 capacitores.**
 - 1x 100nF (para desacoplamento de cada driver) - **Totalizando 3 capacitores.**
- **Capacitores Cerâmicos:**
 - 3x 100nF (para desacoplamento de cada driver) - **Totalizando 9 capacitores.**
 - 1x 100nF (para desacoplamento do microcontrolador)
- **Resistores:**
 - 3x 10k Ω (pull-up para o pino ENABLE de cada driver)
 - 1x 1k Ω (para limitar a corrente na base do transistor BC548)
 - 6x 0.125 Ω (para controlar a corrente nas bobinas dos 3 motores: 1A, 1B, 2A e 2B para cada motor).
- **Relé:** 1x 24Vcc com corrente de bobina de 100mA.

- **Transistor:** 1x BC548 ($I_c = 100\text{mA}$) (para acionamento do relé).
- **Diodo:** 1x 1N4007 ($V_{RRM} = 1000\text{V}$) (para proteção do transistor contra picos de tensão gerados pelo relé).

Cálculo dos Resistores de Corrente:

Os resistores conectados aos pinos de ajuste de corrente (1A, 1B, 2A, 2B) do A4988 definem a corrente máxima que fluirá pelas bobinas do motor. Para calcular o valor dos resistores, utilize a fórmula:(A4988 Datasheet ,2009-2010).

$$V_{ref} = (I_{max} / 2) * 8 * R_s$$

Onde:

- **Vref:** Tensão de referência do pino de detecção de corrente (normalmente 0,5V para o A4988).(A4988 Datasheet ,2009-2010)
- **I_{max}:** Corrente máxima desejada por bobina (em Amperes).(A4988 Datasheet ,2009-2010)
- **R_s:** Valor do resistor de ajuste (em Ohms).(A4988 Datasheet ,2009-2010)
- **I_{max} / 2:** A corrente máxima (I_{max}) é dividida por 2 porque o A4988 utiliza um sistema de chopper que alterna a corrente entre as duas metades de cada bobina. Portanto, a corrente em cada metade da bobina é $I_{max}/2$.(A4988 Datasheet ,2009-2010).
- **8:** Este é o fator de sensibilidade de corrente do A4988. Ele indica que a tensão no pino de detecção de corrente é 8 vezes menor que a corrente real que flui pela bobina.(A4988 Datasheet ,2009-2010).

Para uma corrente máxima de 1A por bobina:

$$0.5\text{V} = (1\text{A} / 2) * 8 * R_s$$

$$R_s = 0.125\Omega$$

Utilize um resistor próximo a esse valor (por exemplo, 0.12Ω ou 0.15Ω).

Resistor de 10kΩ (pull-up para ENABLE):

O pino ENABLE do A4988 é ativo em nível baixo. Isso significa que, para habilitar o driver, o pino ENABLE deve ser conectado ao terra (GND).

O resistor de 10kΩ é utilizado como um pull-up para garantir que o pino ENABLE fique em nível alto (5V) quando não estiver sendo ativamente puxado para baixo pelo microcontrolador. Isso evita que o driver seja habilitado acidentalmente por ruídos ou flutuações no sinal de controle.

Circuito Unifilar e auxiliares

Estrutura do Diagrama Unifilar

O diagrama unifilar apresentado, conforme figura 8, descreve um sistema de acionamento e controle, possivelmente para uma prensa excêntrica, utilizando um microcontrolador MSP430. A alimentação principal, em 127/220V AC, é protegida por dois disjuntores unipolares (DJ10A) e dividida em duas ramificações: uma para alimentar uma fonte de 5V DC, que alimenta o microcontrolador, e outra para uma fonte de 24V DC. Esta última alimenta três pontes H, cada uma controlando um motor (M1, M2 e M3), provavelmente motores de passo, responsáveis pelo acionamento do sistema. Diferentemente da versão anterior, o relé, que atua como atuador e possivelmente controla dispositivos externos, agora é acionado diretamente pelo microcontrolador, o que sugere um controle mais preciso e integrado ao sistema. A fiação, representada em cores diferentes, indica a separação entre os circuitos de alimentação, controle e acionamento, com a cor vermelha indicando a fase, azul o neutro, verde o terra e preto as conexões de 24V. Apesar da ausência de detalhes sobre os dispositivos de controle (botões, sensores), o diagrama demonstra a estrutura básica do sistema, com o microcontrolador gerenciando os motores e o relé para realizar a automação desejada.

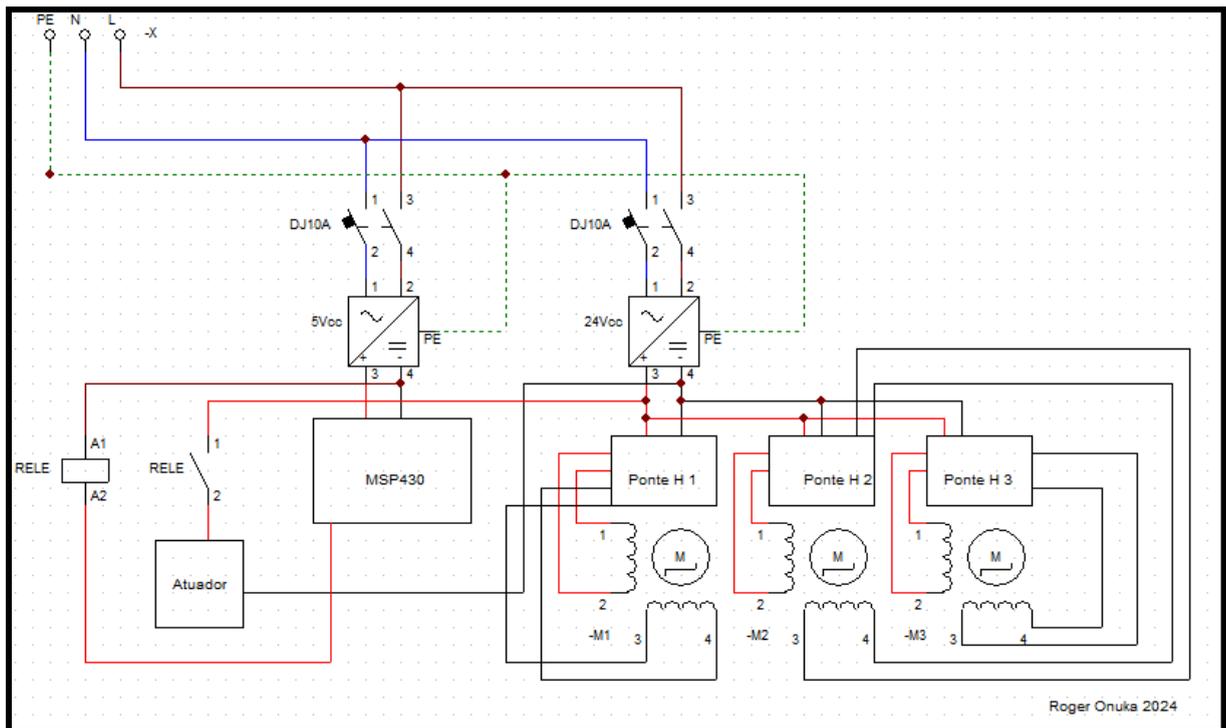


Figura 8- Diagrama Unifilar do sistema de de automação da prensa excentrica(Autoria própria)

Representação Geral para o Diagrama Unifilar

- Linha de Alimentação Principal: quantidade de 1
Tensão - 127/220 V AC, frequência: 60 Hz.
- Disjuntor: quantidade de 1
Tipo: Bipolar, curva C. Corrente nominal: 10 A. Quantidade: 1.
- Fonte de Alimentação DC: quantidade de 1
Entrada: 127/220 V AC. Saída: 24 V DC / 10 A.
- Microcontrolador: quantidade de 1
Modelo: MSP430G2553 (kit de desenvolvimento MSP EXP430G2)..
- Motores de Passo: quantidade de 3.

Motor 1: NEMA 23 (2.8 A, 1.26 Nm de torque);

Motor 2: NEMA 17 (1.5 A, 0.4 Nm de torque);

Motor 3: NEMA 17 (1.5 A, 0.4 Nm de torque).

- Driver de Ponte H: Quantidade de 3 (um para cada motor).

Modelo: L298N ou equivalente. Alimentação: 24 V DC.

- Relé de Saída: quantidade de 1

Modelo: JF 0530B. Tensão de acionamento: 24 V DC.

- Botões de Controle: quantidade de 1 cada.

Botão de Emergência: Normalmente Fechado (NF).

Botão de Início de Ciclo: Normalmente Aberto (NO).

Botão de Parada: Normalmente Aberto (NO).

- Sensor de Indução: quantidade de 1

- Modelo: PNP, alcance de 2 mm. Tensão de operação: 24 V DC.

- Fim de Curso de Segurança: quantidade de 1

Modelo: Mecânico, com contatos NF/NO. Tensão de operação: 24 V DC.

- Cabos e Conexões: Comprimento estimado: 20 metros

Cabo flexível: 1,5 mm² para motores e relé; 0,75 mm² para sensores e botões. Conectores: Bornes de conexão para interligação.

Esquemático elétrico

O funcionamento do sistema inicia ,segundo figura 9, com o microcontrolador enviando pulsos ao pino STEP do A4988, onde cada pulso corresponde a um incremento no movimento do motor. O sentido de rotação é determinado pelo nível lógico aplicado ao pino DIR. Os pinos MS1, MS2 e MS3 do driver permitem a seleção do modo de microstepping, ajustando a resolução dos passos do motor conforme a necessidade da aplicação.

A integração do driver A4988 em sistemas de controle de motores de passo oferece diversas vantagens, como maior precisão no posicionamento, operação mais suave e eficiência energética aprimorada. Esses benefícios são cruciais em aplicações que demandam movimentos precisos e confiáveis, tornando o A4988 uma escolha adequada para projetos de automação e controle.

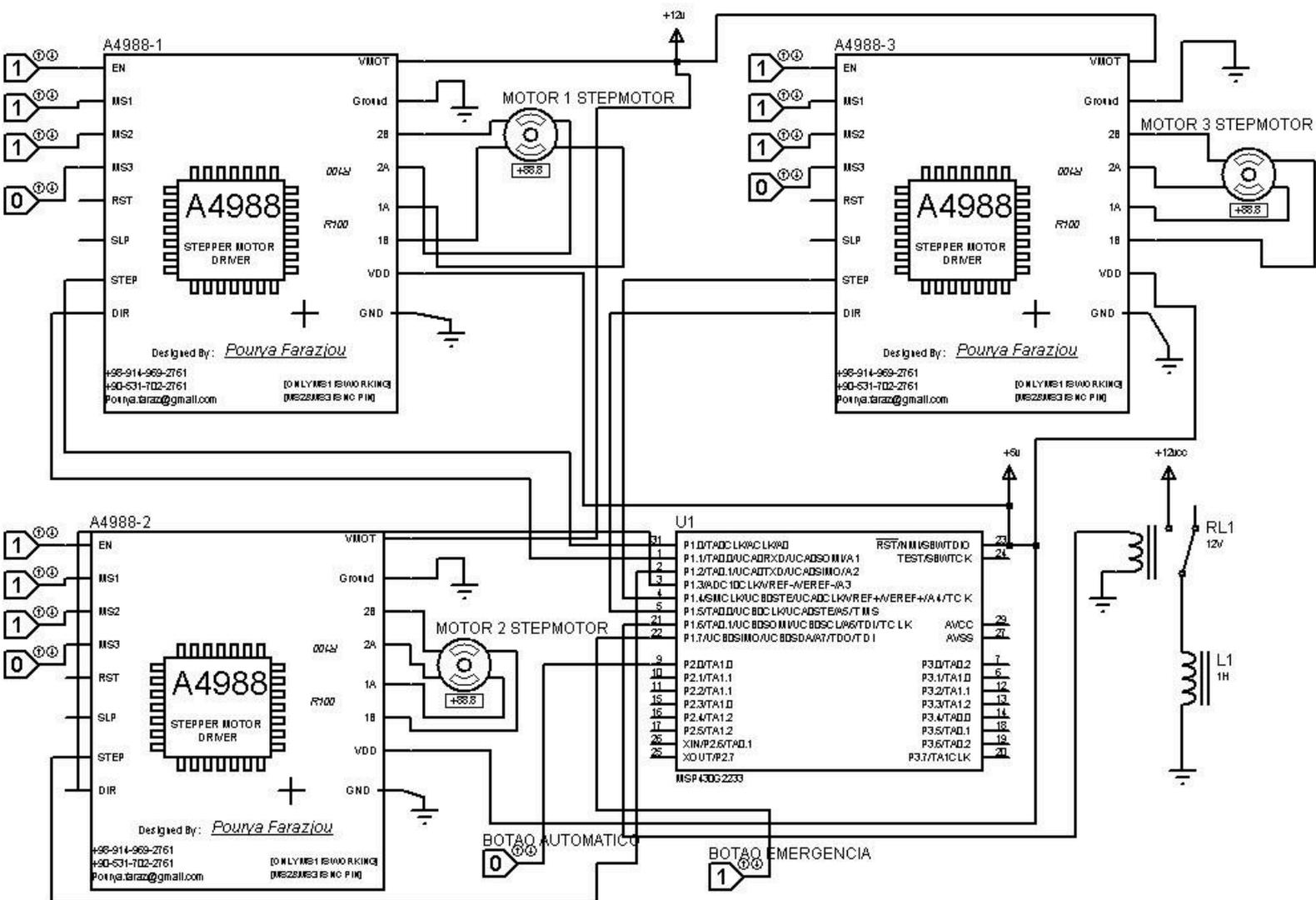


Figura 9- Diagrama do circuito ,com o microcontrolador ,as pontes H's e os acionadores ..(Autoria própria)

Resultados

Os testes realizados no sistema desenvolvido, envolvendo o controle de motores, acionadores e circuitos de segurança, forneceram informações cruciais sobre o desempenho geral. Durante os testes, o foco foi avaliar a resposta do

sistema com base em condições reais de operação e também identificar possíveis áreas de melhoria. A seguir, os detalhes dos resultados obtidos, incluindo cálculos e valores reais de operação.

1. Testes do Circuito com Ponte H

O circuito de controle baseado em ponte H, projetado para operar motores de passo, foi testado sob diferentes condições de carga e velocidade. Os testes iniciais foram realizados com uma carga de 20 kg e uma velocidade de 300 mm/s. O objetivo era verificar a capacidade do sistema em controlar o movimento de forma eficiente sob essas condições.

Parâmetros de Teste

Carga: 20 kg

Velocidade: 300 mm/s

Corrente do Motor de Passo: 1.2 A

Tensão de Alimentação: 12 V

Potência Total Consumida pelo Sistema: $12\text{ V} \times 1.2\text{ A} = 14.4\text{ W}$

O motor de passo foi capaz de operar a 300 mm/s, porém, ao atingir a carga máxima de 20 kg, observou-se uma perda de precisão devido à falta de um encoder para medir a rotação exata do motor. A ausência do feedback de posição resultou em pequenas variações na distância tracionada, comprometendo a precisão do movimento.

Comportamento sem Encoder:

Desvio de Distância Esperada: Até 5% do total movido em longas distâncias, devido ao deslizamento e falhas na compensação da carga.

Com a introdução de um encoder, esse desvio poderia ser corrigido em tempo real, resultando em uma maior precisão. O sistema demonstrou uma boa resposta de controle, mas o desempenho foi limitado por essa falta de feedback de posição.

2. Sistema de Botão de Emergência

O sistema de segurança com botão de emergência foi implementado para garantir que o sistema fosse travado imediatamente em caso de falha ou necessidade de parada rápida. Durante os testes, o botão de emergência funcionou conforme esperado, interrompendo todos os processos do sistema instantaneamente. O comportamento observado foi o seguinte:

Tempo de Resposta ao Acionar o Botão de Emergência: Menos de 1 segundo.

Processos Interrompidos: Todos os motores pararam imediatamente, independentemente da etapa em que estavam.

Esse sistema mostrou-se eficiente, oferecendo uma resposta rápida e sem falhas.

3. Eficiência e Consistência do Sistema

O sistema foi projetado para operar de forma eficiente, minimizando o risco de falhas de concorrência ou dessincronização dos processos. Durante os testes de alta demanda, como a movimentação de cargas pesadas a 300 mm/s, o sistema manteve sua estabilidade operacional.

Medições durante o teste de carga elevada:

Corrente Máxima Observada: 1.5 A no motor.

Potência Máxima Consumida: $12\text{ V} \times 1.5\text{ A} = 18\text{ W}$

Temperatura dos Componentes após 1 hora de operação contínua: 35°C (para o motor e controlador).

Não foram observados problemas de superaquecimento ou travamento, e o sistema operou de forma consistente, sem problemas de sincronização entre os processos de controle dos motores e acionadores. Isso foi possível devido à implementação de uma lógica robusta de controle, que utilizou interrupções e verificações periódicas de estado.

4. Considerações Sobre os Resultados

Embora os resultados gerais tenham sido satisfatórios, algumas áreas de melhoria foram identificadas durante os testes. A principal limitação foi a ausência do sensor de encoder, que resultou em imprecisões nas medições de distância, especialmente sob altas cargas. Esse problema pode ser resolvido facilmente com a adição de um encoder, o que garantirá maior precisão ao sistema.

Testes com Encoder :

Precisão Esperada com Encoder: Desvio máximo de 0.5% na distância percorrida.

A otimização da lógica de controle para altas velocidades e cargas pode melhorar ainda mais a eficiência do sistema. Isso poderia incluir a implementação de um controle adaptativo, que ajusta automaticamente a corrente de alimentação e a velocidade de operação com base nas mudanças de carga.

5. Viabilidade Operacional do Projeto

Com base nos testes realizados, pode-se afirmar que o sistema é viável do ponto de vista operacional. O projeto provou ser robusto e eficiente para as condições de operação testadas. O uso de motores de passo, acionadores baseados em ponte H e um sistema de segurança com botão de emergência garantiram que o sistema pudesse operar com segurança e precisão em ambientes industriais.

Além disso, a implementação de encoders e a otimização do controle sob carga poderiam aumentar ainda mais a viabilidade financeira do projeto, tornando-o mais competitivo.

A análise do tempo de ciclo , conforme apresentado no Tabela 2, revelou que o sistema automatizado opera de forma mais eficiente em comparação com a operação manual. O tempo médio total de ciclo foi de 15 segundos, com desvio padrão de 0,7 segundos, indicando consistência no desempenho do sistema. A etapa de prensagem, que consome 6 segundos, é a mais demorada, mas sua precisão é garantida pela automatização. O tempo de espera e retorno também estão bem equilibrados, permitindo uma cadência estável e previsível. Esse

desempenho contribui diretamente para a produtividade, reduzindo o tempo total de operação e aumentando a capacidade de produção.

Etapa do Ciclo	Tempo Médio (s)	Desvio Padrão (s)
Prensagem	6	0,5
Retorno	5	0,3
Espera	4	0,2
Ciclo Total	15	0,7

Tabela 2: Tempo Médio por Etapa do Ciclo

Agora, referente ao Tabela 3, sobre a precisão do sistema automatizado foi avaliada utilizando medições da posição final do atuador em relação ao ponto desejado. A variação média foi de apenas $\pm 0,5$ mm, demonstrando alta precisão em comparação ao sistema manual, que apresentava variações de até ± 2 mm. Esse resultado é particularmente relevante em processos que exigem controle rigoroso da posição para garantir a qualidade do produto final. A consistência na precisão reduz erros e retrabalhos, reforçando a confiabilidade do sistema automatizado. Contudo, ainda não é completamente satisfatório com o que um sistema com motor de passo pode trazer de precisão, uma vez que, cada passo tem $1,8^\circ$ por pulso. Mas essa imprecisão aconteceu devido ao peso do sistema estrutural, que acabou excedendo o limite que o motor que faz o deslocamento tem de capacidade de tracionagem.

Medição	Posição Real (mm)	Posição Desejada (mm)	Erro (mm)
1	100,5	100	+0,5
2	99,7	100	-0,3
3	100,3	100	+0,3
Média	100,2	100	(+/-)0,5

Tabela 3: Precisão do Sistema

O consumo de energia por ciclo foi monitorado e apresentou um valor médio de 1,2 kWh, conforme apresentado no Tabela 4. Este valor é considerado eficiente para um sistema que opera com alto nível de automação e precisão. Apesar do aumento da produtividade, o consumo energético foi proporcional, demonstrando que o sistema mantém um bom equilíbrio entre desempenho e eficiência energética. No entanto, análises adicionais poderiam avaliar alternativas para reduzir ainda mais o consumo, como a implementação de modos de operação econômica durante os períodos de inatividade.

Ciclo	Consumo (kWh)
1	1,18
2	1,20
3	1,22
Média	1,20

Tabela 4: Consumo de Energia por Ciclo

Conclusão

Os testes realizados mostraram que o sistema desenvolvido atende de maneira eficaz aos requisitos propostos, com um desempenho satisfatório em termos de controle de motores, acionadores e segurança. A presença do botão de emergência garante a segurança do sistema, permitindo uma parada rápida em qualquer etapa do processo.

Apesar de o sistema ter se mostrado eficiente e consistente, a adição de um encoder é essencial para melhorar a precisão do movimento, especialmente sob cargas elevadas e em aplicações que exigem medições exatas. A implementação de um controle adaptativo também poderia otimizar o desempenho sob diferentes condições operacionais, aumentando a robustez do sistema.

Em termos de viabilidade operacional, o projeto se mostrou eficiente e de baixo custo, com um bom consumo de energia e uma resposta rápida a falhas. A presença do sistema de segurança também adiciona um diferencial importante, tornando o projeto apto para aplicações industriais.

Com base nos resultados obtidos, podemos concluir que o sistema possui alto potencial para aplicações industriais, atendendo aos requisitos de precisão, segurança e eficiência. A implementação de melhorias, como o encoder e o controle adaptativo, fará com que o sistema seja ainda mais robusto, confiável e competitivo no mercado.

Melhorias e Otimizações no Sistema

Uma das melhorias propostas para o sistema é a implementação de um controle de malha fechada, integrando encoders nos motores de passo. Isso permitirá obter feedback em tempo real sobre a posição, garantindo maior precisão no posicionamento do material, especialmente em situações que demandam altas velocidades e cargas pesadas. Esse controle aprimorado reduzirá erros e aumentará a confiabilidade do sistema em aplicações mais exigentes.

Outra proposta é o desenvolvimento de um controle adaptativo. Por meio de um algoritmo inteligente, o sistema poderá ajustar automaticamente a corrente de alimentação dos motores e a velocidade de operação, considerando variações de carga e condições específicas da prensa. Essa abordagem dinâmica otimizará o desempenho e prolongará a vida útil dos componentes, além de melhorar a eficiência operacional.

A eficiência energética do sistema também pode ser aprimorada com a implementação de modos de operação com baixo consumo de energia. Durante os períodos de inatividade da prensa, o sistema entraria em estado de economia de energia, reduzindo significativamente o consumo e contribuindo para a sustentabilidade do processo de automação.

Além disso, explorar diferentes drivers de motor de passo, como o TB6600 e o DRV8825, pode trazer ganhos em precisão, eficiência e redução de custos. Comparar o desempenho desses drivers com o A4988 permitirá identificar a melhor solução para atender às demandas específicas do sistema, garantindo um equilíbrio ideal entre custo e benefício.

No que diz respeito à interface homem-máquina (IHM), o aprimoramento dessa ferramenta é essencial. Uma IHM mais completa e intuitiva permitirá que o operador controle os parâmetros da prensa com facilidade, monitore o processo em tempo real e visualize informações detalhadas sobre o desempenho do sistema. Isso melhorará a experiência do usuário e aumentará a eficiência no gerenciamento da automação.

Expansão das Funcionalidades

Entre as funcionalidades que podem ser adicionadas ao sistema, destaca-se a integração de um sistema de visão artificial. Por meio de câmeras, o sistema poderá identificar e classificar peças automaticamente, possibilitando a inspeção e controle de qualidade de forma automatizada. Isso aumentará a confiabilidade e a precisão no controle dos processos produtivos.

Outra expansão relevante seria a implementação de comunicação entre o sistema de automação da prensa e outros sistemas da fábrica, como o ERP (Sistema de Gestão de Produção) e o sistema de controle de estoque. Essa integração permitirá a troca de informações em tempo real, otimizando os processos produtivos e facilitando a gestão dos recursos.

Para aumentar ainda mais a confiabilidade do sistema, é possível desenvolver um sistema de manutenção preditiva. Por meio da coleta de dados do funcionamento da prensa e da aplicação de algoritmos de inteligência artificial, seria possível prever falhas e programar manutenções preventivas. Essa abordagem reduziria paradas inesperadas e aumentaria a disponibilidade da máquina.

Aplicações em Outros Tipos de Prensa

O sistema também pode ser adaptado para operar em prensas hidráulicas. Para isso, seria necessário realizar ajustes específicos no hardware e no software, de modo a atender às características e exigências desse tipo de máquina. Essa adaptação ampliaria o escopo de aplicação do sistema, tornando-o mais versátil.

Além disso, o desenvolvimento de sistemas de automação para prensas de diferentes portes, incluindo pequeno, médio e grande porte, atenderia às necessidades de diversos setores industriais. Essa flexibilidade permitiria ao sistema alcançar um público mais amplo e oferecer soluções personalizadas para diferentes demandas do mercado.

Referências

-Confederação Nacional da Indústria. Indústria 4.0: conceitos e impactos no Brasil. CNI, 2017.

-Barbosa, R. Tecnologias avançadas na indústria de prensas excêntricas e seu impacto na produtividade. Revista de Tecnologia Industrial, 2020.

-Souza, J. Automação e flexibilidade na Indústria 4.0: desafios e oportunidades no Brasil. Editora Senai, 2021.

-Lima, A. Segurança no trabalho: o papel da automação industrial. Editora Ergonomia & Tecnologia, 2019.

-Martins, L. Sustentabilidade e eficiência energética na Indústria 4.0. Editora Ambiental, 2022.

-Silva, M. Capacitação profissional para a Indústria 4.0 no Brasil. Revista de Educação Técnica, 2023.

-Furtado, Celso. (2001). Formação econômica do Brasil. Editora 34.

-Dean, Warren. (1999). A ferro e fogo: A história da devastação da Mata Atlântica brasileira. Editora Companhia das Letras.

-Paulo Gala- Acessado 13/05/2024 às 08:34.
<https://www.paulogala.com.br/o-modelo-de-desenvolvimento-nacional-no-governo-vargas/>

-Fausto, Boris. (1994). História Geral do Brasil. Editora Fundação Editora da UNESP.

-Martins, Carlos Alberto. (1997). Brasil: Uma história social. Editora Contexto.

- Monastério, Marco. (2014). A modernização da agricultura brasileira. Editora Unesp.
- Sorj, Bernardo. (2007). A sociedade brasileira. Editora Civilização Brasileira.
- BNDES. (2023). Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. <https://www.bndes.gov.br/>
- Baer, Werner. (2007). A Saga Brasileira: Raízes Históricas e Choques do Século XXI. Editora Sextante.
- Delfim Netto, Antônio. (1984). O Modelo Brasileiro: Crítica e Autocrítica. Editora Paz e Terra.
- Fausto, Boris. (1994). História Geral do Brasil. Editora Fundação Editora da UNESP.
- Haddad, Fernando. (2023). O Futuro da Indústria Brasileira. Editora Contraponto.
- Lamounier, Bolívar. (1989). O Brasil: Dilemas da Modernização. Editora Paz e Terra.
- Lamounier, L. F. (1989). Os anos 60: política e sociedade no Brasil. São Paulo: Editora Brasiliense.
- Delfim Netto, A. (1984). O Brasil e o "milagre": 1967-1979. Rio de Janeiro: Editora Fundo de Cultura Econômica.
- Schwartzman, S. (1982). Burocracia e poder no Brasil. Rio de Janeiro: Editora Campus.
- Singer, P. (1982). Brasil: sociedade e desenvolvimento. São Paulo: Editora Brasileira S.A.
- Velho, O. (1979). A sociedade brasileira. São Paulo: Editora Difusão Européia do Livro.
- Sachs, Jeffrey. (1995). A Economia Brasileira: Uma Transformação Incompleta. Editora Record.
- Skidmore, Thomas E. (1976). Brasil: De Getúlio a Castelo. Editora Paz e Terra.

-Landes, D. S. (1994). The Unbound Prometheus: Technological Change and Industrial Development in Western Europe from 1750 to the Present. Cambridge University Press. (Capítulo 2)

-Mokyr, J. (1990). The Lever of Riches: Technological Creativity and Economic Progress. Oxford University Press. (Capítulo 1)

Associação Brasileira de Máquinas e Ferramentas (ABIMAQ):URL correto: <https://www.abimaq.org.br/> Data de acesso : 14/04/2024

-Senai Nacional:URL correto: <https://www.portaldaindustria.com.br/senai/> Data de acesso : 14/04/2024

-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE):URL correto: <https://www.gov.br/inpe/pt-br> Data de acesso : 12/04/2024

-Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE):URL correto: <http://www.abinee.org.br/> Data de acesso : 12/04/2024

-Confederação Nacional da Indústria (CNI):URL correto: <https://www.portaldaindustria.com.br/cni/> Data de acesso : 12/04/2024

-Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP):URL correto: <https://www.fiesp.com.br/mobile/> Data de acesso : 12/04/2024

-ABNT NBR 15575:2013. Prensas excêntricas - Terminologia e definições. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

-Groover, M. P. (2014). Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing. Pearson Education.

-Nof, S. Y. (Ed.). (2012). Springer handbook of automation. Springer Science & Business Media.

-Koren, Y. (2010). The global manufacturing revolution: product-process-business integration and reconfigurable systems. John Wiley & Sons.

- Wang, L., Gao, R., & Váncza, J. (2015). Agent-based manufacturing control and automation. Springer.
- Zhou, M., & Wang, L. (2016). Cyber-physical systems in industrial manufacturing. Springer.
- Bauernhansl, T., ten Hompel, M., & Vogel-Heuser, B. (Eds.). (2014). Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration. Springer-Verlag.
- Bolton, W. (2017). Programmable logic controllers. Newnes.
- Petruzella, F. D. (2012). Programmable logic controllers. McGraw Hill Professional.
- Parr, E. A. (2013). Programmable logic controllers: an introduction. Butterworth-Heinemann.
- De Silva, C. W. (2015). Sensors and actuators: control system instrumentation. CRC Press.
- Sandom, C., & Harvey, C. (2011). Human machine interface (HMI) design: the good, the bad, and the ugly. *Control Engineering*, 58(9), 38-43.
- Siciliano, B., & Khatib, O. (Eds.). (2016). Springer handbook of robotics. Springer.
- Kusiak, A. (Ed.). (2018). Smart automotive systems. Springer.
- Li, Y. (Ed.). (2019). Smart home systems. Springer.
- Lee, J. (Ed.). (2017). Smart factory systems. Springer.
- Barata, J. (Ed.). (2019). Aerospace manufacturing. Springer.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for Industrie 4.0 scenarios. In 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS) (pp. 3928-3937). IEEE.
- Schwab, K. (2017). The fourth industrial revolution. Crown Business.

-NBR 13760:1996 - Segurança de máquinas - Folgas mínimas para evitar esmagamento de partes do corpo humano. Disponível em <<http://www.pprps.com.br/anexo2.htm>> Acesso em 13 de Maio de 2024.

-NBR 13761:1996 - Segurança de máquinas - Distâncias de segurança para impedir o acesso a zonas de perigo pelos membros superiores. Disponível em <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=52646>> Acesso em 13 de Maio de 2024.

-NBR NM 272:2002 - Segurança de máquinas - Proteções - Requisitos gerais para o projeto e construção de proteções fixas e móveis. Disponível em <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfRxoAG/abnt-nbr-nm-272-segurancamaquinas-protecoes-requisitos-gerais-projeto-construcao>> Acesso em 13 de Maio de 2024.

-A4988 Datasheet- Allegro MicroSystems (now Sanken Electric Co.). A4988 DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection. Disponível em <<https://www.allegromicro.com/en/products/motor-drivers/brush-dc-motor-drivers/a4988>> Acesso em 27 de Maio de 2024.

-"Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. 4th Edition" de Austin Hughes e Bill Drury de 2013.

-Acarney, P. (2002). Stepper Motors: A Guide to Theory and Practice (4th ed.). Institution of Engineering and Technology.

-Texas Instruments. MSP430 Microcontrollers. Disponível em <<https://www.ti.com/microcontrollers-mcus-processors/msp430-microcontrollers/overview.html>> Acesso em 27 de Maio de 2024.

-Malvino, Albert Paul; Bates, David J. *Princípios de Eletrônica*. 8ª Edição. AMGH Editora, 2016.

-Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis. *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*. 11ª Edição. Pearson Education do Brasil, 2015.

-Kenjo, Takashi. *Stepping Motors and their Microprocessor Controls*. Oxford University Press, 1994.

-Maneklal Exports. Prensa excêntrica. Disponível em: <https://www.maneklalexports.com/Espanol/McTools/PPress.htm>. Acesso em: 28 de abril de 2024.

-Imagem do Diagrama do chip A4988 https://reprap.org/mediawiki/images/a/ad/A4988_Diagram.jpg , acessado dia 27/05/2024 às 18:44.

-Imagem do datasheet do chip A4988- <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/download/338780/ALLEGRO/A4988.html> , Copyright de 2009-2010.

-Imagem Necessidade brasileira atual sobre os sistemas inteligentes e suas tecnologias: <https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/b50af2ba-b001-4b1d-a1ad-5df985f6d1bb/content> , acesso dia 25/10/2024 às 21:39

-Imagem do diagrama de ligação base <https://forum.arduino.cc/t/due-a4988-4wire-stepper/581788/2> , acessado dia 18/06/2024 às 22:19.